

Aplicação de dois modelos hidrológicos em uma pequena bacia rural do município de Joinville (SC)

Jorge Miguel Vescovi

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto Pompêo

2011/2



VESCOVI, J., M. Aplicação de dois modelos hidrológicos em uma pequena bacia rural do município de Joinville (SC). Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2011. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC.


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

APLICAÇÃO DE DOIS MODELOS HIDROLÓGICOS EM UMA
PEQUENA BACIA RURAL DO MUNICÍPIO DE JOINVILLE (SC)

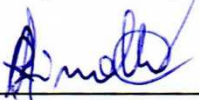
JORGE MIGUEL VESCOVI

Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão do
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária
e Ambiental – TCC II

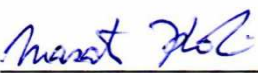
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Cesar Augusto Pompêo
(Orientador)



Profª. Drª. Alexandra Rodrigues Finotti
(Membro da Banca)



Prof. Dr. Masato Kobiyama
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, sem os quais nada disso seria possível.

Ao professor Cesar Augusto Pompêo, pela confiança, auxílio e prestatividade em todos os aspectos deste trabalho.

Aos colegas do Núcleo de Estudos da Água, Leonardo e Marcos, pelo auxílio com os dados de campo.

À Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão de Joinville, pela disponibilização dos mapas e ortofotos da área de estudo.

RESUMO

Os métodos utilizados na modelagem e o nível de discretização da bacia hidrográfica figuram entre os diversos fatores que afetam a resposta dos modelos hidrológicos. Este trabalho apresenta uma análise comparativa desses fatores por meio da aplicação de dois modelos de características distintas em uma bacia configurada de três maneiras distintas. Para tal, foram aplicados os modelos SWMM e HEC-HMS em uma pequena bacia com características rurais localizada no município de Joinville, SC.

Os resultados indicaram que, em média, o modelo SWMM apresenta picos de vazão que correspondem a 75,9% dos obtidos pelo HEC-HMS e que, a medida que o nível de discretização diminui, os hidrogramas resultantes são atenuados (diminuição total do pico de vazão de 27,6% no HEC-HMS e 17,7% no SWMM).

Palavras-chave: modelos hidrológicos; HEC-HMS; SWMM; discretização.

ABSTRACT

The methods used for modeling and watershed's discretization level are amongst the various factors affecting the response of hydrologic models. This paper presents a comparative analysis of these factors through the application of two models of different characteristics set in three different levels of watershed discretization. For this, the models SWMM and HEC-HMS were applied in a small rural basin located in Joinville City, SC.

The results indicated that, on average, SWMM model achieves peak flows that reach 75.9% of the ones obtained by HEC-HMS and also that, as the level of watershed discretization decreases, the resulting hydrographs are attenuated (reduced total peak flow of 27.6% in HEC-HMS and 17.7% in SWMM).

Keywords: hydrologic models; HEC-HMS; SWMM; watershed discretization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com Abbott e Refsgaard (1996).	19
Figura 3.2 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com Chow (1988).	19
Figura 3.3 - Blocos que compõem o modelo SWMM e suas inter-relações.	22
Figura 4.1 – Localização da bacia.....	32
Figura 4.2 – Modelo digital de elevação (MDE) da bacia	33
Figura 4.3 – Uso e ocupação do solo	34
Figura 4.4 – Esquema dos canais principais da bacia	36
Figura 4.5 – Dimensões medidas das seções	36
Figura 4.6 - Representação da bacia idealizada no modelo.....	38
Figura 4.7 - Bacia irregular para cálculo da largura representativa.....	39
Figura 4.8 – Representação da bacia como um reservatório não-linear.	40
Figura 4.9 – Representação típica do escoamento no modelo.....	46
Figura 4.10 - Curvas de intensidade, duração e frequência.....	50
Figura 4.11 – Níveis de discretização da bacia	51
Figura 4.12 – Relações de fluxo entre as configurações	52
Figura 4.13 – Chuva de projeto.....	63
Figura 5.1 – Hidrogramas resultantes para a configuração 1	65
Figura 5.2 - Vazões de pico para as sub-bacias na configuração 1	66
Figura 5.3 – Atenuação da vazão de pico para os canais na configuração 1	67
Figura 5.4 - Hidrogramas resultantes para a configuração 2.....	68
Figura 5.5 – Vazões de pico para as sub-bacias na configuração 2.....	69
Figura 5.6 – Atenuação da vazão de pico nos canais para a configuração 2.....	69
Figura 5.7 - Hidrogramas resultantes para a configuração 3.....	70
Figura 5.8 - Hidrogramas resultantes para o modelo HEC-HMS.....	72
Figura 5.9 - Hidrogramas resultantes para o modelo SWMM	73
Figura A 1 - Elementos utilizados no modelo para a configuração 1	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação dos modelos utilizados em recursos hídricos.....	20
Tabela 4.1 – Uso e ocupação do solo para a bacia de estudo	35
Tabela 4.2 - Medidas das seções transversais dos canais	37
Tabela 4.3 – Precipitações máximas diárias registradas na estação 02648014.....	48
Tabela 4.4 - Informações requeridas para o elemento sub-bacia.....	53
Tabela 4.5 – Coeficientes de Manning para superfícies.	54
Tabela 4.6 – Valores de armazenamento em depressões para coberturas.....	54
Tabela 4.7 – Informações requeridas para o elemento junção.....	56
Tabela 4.8 – Informações requeridas para o elemento conduto.....	56
Tabela 4.9 – Coeficientes de Manning para condutos fechados.....	57
Tabela 4.10 – Coeficientes de Manning para canais abertos.....	58
Tabela 4.11 – Dados requeridos para as sub-bacias utilizando o método SCS para perdas e geração do HU	59
Tabela 4.12 - Dados requeridos para os canais utilizando o método de propagação por onda cinemática	60
Tabela 4.13 – Picos de vazão, em m ³ /s, para diferentes durações de chuva	62
Tabela 4.14 - Chuva de projeto	62
Tabela 5.1 – Parâmetros resultantes para as sub-bacias na configuração 1	65
Tabela 5.2 – Parâmetros resultantes para os canais na configuração 1	66
Tabela 5.3 - Parâmetros resultantes para as sub-bacias na configuração 2.....	68
Tabela 5.4 – Parâmetros resultantes para os canais na configuração 2.....	69
Tabela 5.5 – Parâmetros resultantes para as bacias na configuração 3	71
Tabela 5.6 – Parâmetros resultantes para o modelo HEC-HMS	72
Tabela 5.7 - Parâmetros resultantes para o modelo SWMM	73
 Tabela A 1 - Valores de CN para os diferentes usos do solo.....	 82
Tabela A 2 - Usos do solo para as sub-bacias A, B e C.....	82
Tabela A 3 - Usos do solo para as sub-bacias D, E e F	83
Tabela A 4 - Usos do solo para as sub-bacias G, H e I.....	83
Tabela A 5 - Usos do solo para a sub-bacia J.....	84

LISTA DE SIGLAS

ANA	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
CN	CURVE NUMBER
CUHP	COLORADO UNIT HYDROGRAPH PROCEDURE
US EPA	UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY
EPAGRI	EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA
HEC	HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER
HMS	HYDROLOGIC MODELING SYSTEM
ILLUDAS	ILLINOIS URBAN DRAINAGE SIMULATOR
LABHIDRO	LABORATÓRIO DE HIDROLOGIA
MDE	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
SEPLAN	SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO
SWMM	STORM WATER MANAGEMENT MODEL
SCS	SOIL CONSERVATION SERVICE
UFSC	UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
USACE	UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS
USGS	UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY
WRE	WATER RESOURCES ENGINEERS

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	13
2.1.	OBJETIVO GERAL	13
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3.	REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1.	MODELOS.....	14
3.1.1.	CLASSIFICAÇÃO.....	15
3.1.1.1.	DE ACORDO COM A ALEATORIEDADE.....	15
3.1.1.2.	DE ACORDO COM A DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS MODELADOS	15
3.1.1.3.	DE ACORDO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS	16
3.1.1.4.	DE ACORDO COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL	16
3.1.1.5.	DE ACORDO COM O MÉTODO DE RESOLUÇÃO	16
3.1.1.6.	DE ACORDO COM A DEPENDÊNCIA TEMPORAL.....	17
3.1.1.7.	DE ACORDO COM A NATUREZA DOS PARÂMETROS	17
3.1.1.8.	DE ACORDO COM A LINEARIDADE.....	17
3.2.	MODELOS HIDROLÓGICOS	17
3.2.1.	CLASSIFICAÇÃO.....	18
3.2.2.	CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO	20
3.3.	STORM WATER MANAGEMENT MODEL - SWMM.....	21
3.3.1.	CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS	23
3.3.1.1.	BLOCO EXECUTIVE.....	23
3.3.1.2.	BLOCO COMBINE.....	23
3.3.1.3.	BLOCO STATISTICS	23
3.3.1.4.	BLOCO RAIN	23
3.3.1.5.	BLOCO TEMP.....	24
3.3.1.6.	BLOCO GRAPH.....	24
3.3.1.7.	BLOCO EXTRAN	24
3.3.1.8.	BLOCO STORAGE/TREATMENT	24
3.3.1.9.	BLOCO RUNOFF.....	24
3.3.1.10.	BLOCO TRANSPORT	25

3.3.2.	APLICAÇÕES.....	25
3.4.	HYDROLOGIC MODELING SYSTEM - HEC-HMS.....	27
3.4.1.	COMPONENTES.....	28
3.4.2.	APLICAÇÕES.....	28
3.5.	DISCRETIZAÇÃO DA BACIA	30
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA.....	32
4.1.1.	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	33
4.1.2.	SISTEMA HÍDRICO.....	35
4.2.	DESCRIÇÃO DOS MODELOS	37
4.2.1.	SWMM	37
4.2.1.1.	REPRESENTAÇÃO DAS SUB-BACIAS	37
4.2.1.2.	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	40
4.2.1.3.	PROPAGAÇÃO DO ESCOAMENTO	41
4.2.1.3.1.	Escoamento permanente	41
4.2.1.3.2.	Onda dinâmica	42
4.2.1.3.3.	Onda cinemática	42
4.2.1.4.	INFILTRAÇÃO.....	42
4.2.1.4.1.	Método de Horton.....	43
4.2.1.4.2.	Método de Green-Ampt	43
4.2.1.4.3.	Método do SCS Curve Number	44
4.3.	HEC-HMS.....	45
4.3.1.1.	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	45
4.3.1.1.1.	HIDROGRAMA UNITÁRIO DO SCS	46
4.4.	DADOS HIDROLÓGICOS	47
4.4.1.	CURVAS DE INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA	49
4.5.	APLICAÇÃO DO MODELO	50
4.5.1.	DISCRETIZAÇÃO DA BACIA.....	50
4.5.2.	DADOS REQUERIDOS	52
4.5.2.1.	SWMM	52
4.5.2.1.1.	Sub-bacias.....	52
4.5.2.1.2.	Junções.....	55

4.5.2.1.3.	Condutos	56
4.5.2.2.	HEC-HMS.....	58
4.5.2.2.1.	Sub-bacias	58
4.5.2.2.2.	Junções	60
4.5.2.2.3.	Canais	60
4.5.3.	CHUVA DE PROJETO	61
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1.	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS	64
5.1.1.	CONFIGURAÇÃO 1	64
5.1.2.	CONFIGURAÇÃO 2	67
5.1.3.	CONFIGURAÇÃO 3	70
5.2.	DISCRETIZAÇÃO	71
5.2.1.	HEC-HMS.....	71
5.2.2.	SWMM.....	72
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	75
7.	REFERÊNCIAS	77
	ANEXOS	81
	ANEXO A - ELEMENTOS DA BACIA	81
	ANEXO B - USOS DO SOLO	82

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de modelos hidrológicos de chuva-vazão em bacias hidrográficas rurais em vias de urbanização é bastante comum. A natureza diferenciada com que ocorre o escoamento em áreas urbanas levou à formulação de modelos específicos para esses ambientes. Dessa maneira, para uma mesma área de estudo pode ocorrer a aplicação de métodos distintos para análise de cenários diversos. Como grande parte da Hidrologia é fortemente vinculada ao empirismo, diferentes métodos frequentemente apresentam grande variabilidade entre si.

Durante a aplicação do modelo cabe ao modelador, com base na disponibilidade de dados, precisão requerida, disponibilidade de tempo ou financeira, decidir o nível adequado de discretização da bacia para atender as necessidades do estudo. Uma maior discretização significa maior detalhamento, a simplificação decorre do contrário. Da mesma forma que essa escolha afeta a entrada de dados, a resposta do modelo ou a saída de dados também é afetada.

O objetivo deste trabalho é aplicar dois modelos hidrológicos de chuva-vazão com características distintas em uma pequena bacia em processo de urbanização do município de Joinville, SC. Os modelos utilizados são o Storm Water Management Model (SWMM), voltado mais especificamente para áreas urbanas e o Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), utilizando os métodos tradicionais de modelagem para áreas rurais.

A temática deste trabalho está relacionada ao envolvimento do Núcleo de Estudos da Água (NEA), laboratório integrado ao departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, com a implantação do novo campus da UFSC em Joinville. Pompêo (2010) realizou o estudo hidrológico desse local. O presente trabalho faz proveito dessa iniciativa, aplicando os modelos mencionados em uma parcela dessa área, uma vez que a mesma é favorável ao objetivo mencionado.

2. OBJETIVOS

Com este trabalho espera-se alcançar os seguintes objetivos:

2.1. OBJETIVO GERAL

Aplicar os modelos SWMM e HEC-HMS em uma pequena bacia hidrográfica com características rurais localizada no município de Joinville, configurando-a em três diferentes níveis.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar as respostas dos modelos para cada uma das configurações de bacia adotadas; e
- Comparar os efeitos da discretização da bacia em cada um dos modelos.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão apresentados, de maneira sucinta, termos, conceitos e outros tópicos julgados de importância fundamental para um melhor entendimento da temática abordada.

3.1. MODELOS

Modelos são formas simples de representação da realidade. Essa representação pode ser física ou abstrata. De acordo Rennó e Soares (2000, p. 4) “um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros.” Os parâmetros são valores constantes no tempo, mas podem variar espacialmente. As variáveis podem ter flexibilidade tanto temporal como espacial.

A observação de fenômenos naturais leva à formulação dos modelos. Como não é possível levantar todos os processos inerentes ao fenômeno analisado, diz-se que sua representação da realidade é simplificada. A não consideração de todos os elementos constituintes de um sistema não deve ser visto como um entrave para o uso de modelos, desde que os fenômenos considerados sirvam satisfatoriamente ao uso requerido. Hillel (1977) comenta que quando a representação criada pelo modelo começa a destoar da realidade, seus resultados são ilusórios, sendo necessária uma intervenção. Nesse caso, se o modelo foi concebido considerando-se apenas uma série de fenômenos dita de primeira importância, devem ser adicionados aqueles de importância subsequente até que o nível requerido de correlação com a realidade seja atingido. Contudo, por mais preciso que um modelo seja, fundamentalmente sempre será apenas uma representação da realidade.

Hillel (1977) comenta que a concepção da modelagem matemática está fortemente ligada aos princípios do método científico, enunciados por Francis Bacon em seu livro *Novum Organum* (1620). São eles:

- Observação do sistema real em operação;
- Formulação de uma hipótese para explicar como o sistema opera;
- Predição do comportamento do sistema com base na hipótese formulada; e
- Desempenho dos experimentos (para testar a validade das predições do modelo).

3.1.1. CLASSIFICAÇÃO

Os modelos são comumente divididos em: físicos, analógicos e matemáticos. A reprodução de um fenômeno em uma escala qualquer constitui o modelo físico, assim, uma barragem construída em escala reduzida utilizada para estudo do fluxo de sedimentos é um modelo dessa natureza. A comparação ou analogia entre dois fenômenos distintos, que auxilia na compreensão do fenômeno estudado, é o que constitui o modelo analógico. Um exemplo desse modelo é a utilização de fluídos e suas propriedades para entendimento do comportamento de ondas de calor. Quando equações matemáticas representam um fenômeno tem-se um modelo dito matemático.

A seguir será apresentada a classificação dos modelos matemáticos, segundo Hillel (1977), Chow (1988), USACE-HEC (2000), Rennó e Soares (2000) e Gontijo (2007).

3.1.1.1. DE ACORDO COM A ALEATORIEDADE

- Estocástico: uma ou mais variáveis apresentam comportamento aleatório, ou seja, levam em conta leis probabilísticas. Dessa maneira, uma entrada de dados idêntica produz resultados distintos. Embora esse tipo de modelo possa ter um comportamento mais apropriado em determinados casos, uma vez que leva em conta a potencialidade de ocorrência dos fenômenos modelados, sua utilização para fins didáticos ou investigação da influência de variáveis nos processos hidrológicos simulados deve ser cautelosa, já que esse comportamento aleatório pode dificultar o entendimento dos fenômenos simulados; e

- Determinístico: nenhuma das variáveis presentes no modelo apresenta comportamento aleatório. Assim, sempre que uma entrada de dados específica é utilizada obtém-se o mesmo resultado.

3.1.1.2. DE ACORDO COM A DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS MODELADOS

- Empírico: baseado em observações de entrada e saída de dados. Os processos físicos que atuam nos fenômenos modelados não são conhecidos ou são simplificados. Por não explicitar todos os processos são também conhecidos como modelos de caixa-preta. São simples e práticos, mas pouco flexíveis, devido ao ajuste matemático das variáveis para as situações observadas. Sua utilização em simulações que divirjam consideravelmente das situações originais é desaconselhada;

- Fisicamente baseado: baseados em processos físicos. Por deixar transparecer os processos físicos que atuam nos fenômenos modelados são também conhecidos como modelos de caixa branca. Os parâmetros utilizados têm significação física, ou seja, podem ser mensurados; e

- Conceitual: combinam características dos modelos anteriores, mesclando processos físicos com equações ajustadas empiricamente. Por esse motivo recebem o nome de modelos de caixa cinza.

3.1.1.3. DE ACORDO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS

- Discreto: realiza a simulação de apenas um evento. Para simulações de curta duração, geralmente não passando de alguns dias; e

- Contínuo: simulação contínua no tempo. Analisa a resposta da bacia durante os eventos modelados e entre seus intervalos. Para simulações de longa duração. Embora os fenômenos hidrológicos tenham natureza contínua, os modelos mais utilizados são os discretos.

3.1.1.4. DE ACORDO COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL

- Concentrado: as variáveis de entrada são valores médios para as áreas consideradas, sendo assim, esse tipo de modelo não leva em conta a dependência espacial das variáveis; e

- Distribuído: contempla a dependência espacial das variáveis. De certa forma, modelos distribuídos são modelos concentrados com maior discretização espacial. De acordo Beven (2001), esses tipos de modelos não estão sendo desenvolvidos apenas porque os recursos computacionais, as linguagens de programação orientadas, as interfaces gráficas e os bancos de dados espaciais de hoje tornam a sua implementação relativamente fácil, mas porque há uma demanda por predições práticas do efeito das mudanças de uso do solo, de fontes de poluição não-pontuais, de riscos e impactos de erosão, etc.

3.1.1.5. DE ACORDO COM O MÉTODO DE RESOLUÇÃO

- Analítico: as equações são solucionadas de maneira analítica, em uma única etapa de cálculo; e

- Computacional ou numérico: as equações são resolvidas por iteração, em várias etapas de cálculo.

3.1.1.6. DE ACORDO COM A DEPENDÊNCIA TEMPORAL

- Dinâmico: dotado de processos com dependência temporal. Chow (1988) classifica os modelos determinísticos com essa característica como modelos de escoamento variado. Já modelos estocásticos na mesma circunstância são denominados independentes ao tempo; e

- Estático: processos modelados independem do tempo. Chow (1988) classifica os modelos determinísticos com essa característica como modelos de escoamento permanente. Já modelos estocásticos na mesma circunstância são denominados correlatos ao tempo.

3.1.1.7. DE ACORDO COM A NATUREZA DOS PARÂMETROS

- Parâmetros ajustados: os parâmetros que compõem o modelo não representam características físicas, mensuráveis, da bacia. São utilizados para ajustes de equações, tendo significado puramente matemático; e

- Parâmetros medidos: os parâmetros utilizados no modelo apresentam significação física, podendo ser medidos direta ou indiretamente.

3.1.1.8. DE ACORDO COM A LINEARIDADE

- Linear: um modelo é dito linear pela teoria dos sistemas se respeita o princípio da superposição, e linear no sentido estatístico se uma variável de saída segue uma equação de primeiro grau a partir de uma variável de entrada; e

- Não-linear: quando os princípios da linearidade supracitados não são seguidos o modelo é considerado não-linear.

3.2. MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelos hidrológicos são modelos que estudam o ciclo hidrológico em bacias hidrográficas ou parte delas. Vestena (2008, p.5) define o ciclo hidrológico como “a sequência fechada dos processos hidrológicos na escala global por onde a água circula”. Segundo Kobiyama (1999, p.52), bacia hidrográfica “é definida como uma região sobre a terra na qual o escoamento superficial em qualquer ponto converge para um único ponto fixo, chamado exutória.”

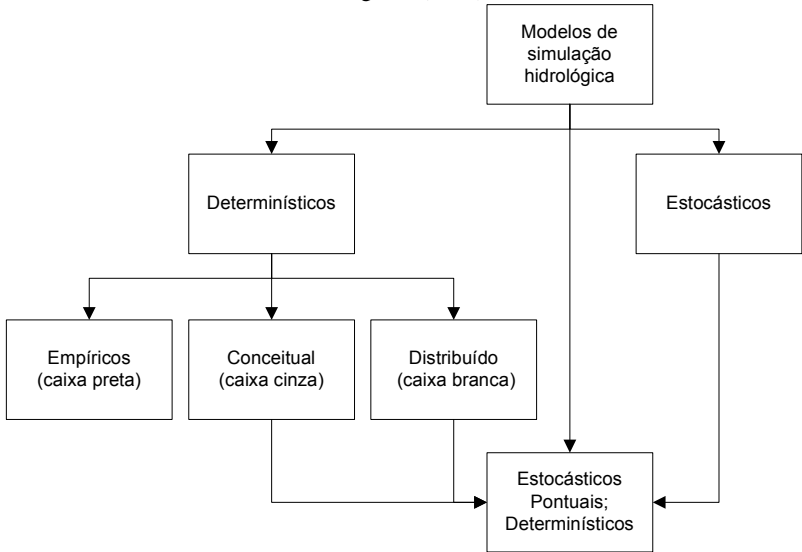
Os objetivos dos modelos hidrológicos são simplificar e generalizar uma realidade complexa, prever a ocorrência de eventos hidrológicos e auxiliar no planejamento dos usos futuros dos recursos hídricos (MORE, 1975). De maneira semelhante, Chow (1988) afirma que o objetivo dos modelos hidrológicos é estudar a forma como o sistema opera e prever suas saídas. Oliveira (2003, *apud* Macedo, 2010), afirma que a finalidade de um modelo hidrológico é determinar os elementos que compõem o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, estimar a magnitude das variáveis envolvidas na simulação e apresentar meios de prever seu comportamento. A qualidade de um modelo hidrológico depende de sua capacidade de representar mais fielmente os fenômenos hidrológicos. A ineficácia de um modelo é resultado da não compreensão dos fenômenos ou da incapacidade de programá-los. Segundo Beven (2001), as limitações das técnicas de monitoramento no tempo e no espaço são fatores que contribuem para a baixa correlatividade dos modelos com a realidade, limitação essa que não permite a obtenção de todos os dados necessários. Tucci (1998) afirma que a qualidade e quantidade dos dados hidrológicos, a simplificação dos processos envolvidos e a dificuldade de formular matematicamente os mesmos dificultam o desenvolvimento dos modelos hidrológicos.

Os pontos fortes dos modelos hidrológicos são a sua abrangência, podendo ser aplicados para uma grande variedade de situações. Além disso, a integração desses modelos com ecossistemas e ecologia, biosistemas, geoquímica e ciências atmosféricas elevam sua importância em questões ambientais. Suas deficiências ficam por conta da grande quantidade de dados requeridos, falta de medidas quantitativas de sua confiabilidade, desconhecimento claro de suas limitações e falta de orientação a respeito de sua aplicabilidade (SINGH & FREVERT, 2006).

3.2.1. CLASSIFICAÇÃO

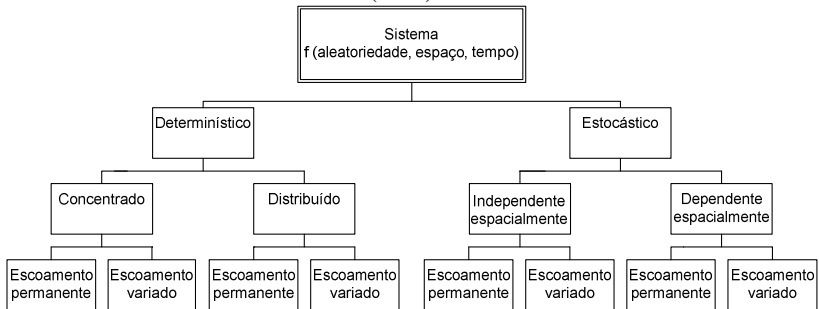
Diversas são as maneiras de classificar os modelos hidrológicos. Singh (1995, *apud* Silva, 2005) sugere classificações de acordo com o uso do solo, com sua aplicação e com os efeitos de escala. Tucci (1998) classifica os modelos utilizados em questões que envolvam recursos hídricos de acordo com seu uso. Contudo, tipicamente, os modelos hidrológicos seguem a classificação dos modelos matemáticos. Algumas dessas classificações são mostradas na Figura 3.1, Figura 3.2, bem como na Tabela 3.1, de acordo com diferentes autores.

Figura 3.1 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com Abbott e Refsgaard (1996).



Fonte: Abbott e Refsgaard (1996).

Figura 3.2 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com Chow (1988).



Fonte: Chow (1988).

Tabela 3.1 - Classificação dos modelos utilizados em recursos hídricos.

Nome	Características	Usos
Chuva-Vazão	Determina a vazão resultante da precipitação	Extensão de séries de vazões; dimensionamento; previsão em tempo real; avaliação de uso do solo
Vazão-Vazão	Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto à montante	Extensão de séries de vazões; dimensionamento, previsão de cheias
Geração Estocástica de Vazão	Calcula a vazão a partir de séries históricas	Dimensionamento do volume de um reservatório
Fluxo saturado	Calcula vazão potencial e movimento do escoamento subterrâneo	Capacidade de bombeamento; nível de lençol freático; interação no aquífero
Hidrodinâmico	Cálculo das características hidráulicas	Simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante
Qualidade da água	Determinação de parâmetros de qualidade da água	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais
Redes de canais e condutos	Otimiza os diâmetros dos condutos e verifica as condições de projeto	Rede de abastecimento de água; rede de irrigação
Operação de reservatórios	Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos
Planejamento e gestão de sistemas múltiplos	Simula condições de projeto e operação de sistemas	Reservatórios; canais; estações de tratamento; irrigação; navegação fluvial

Fonte: Adaptado de Tucci (1998, *apud* Gontijo, 2007).

3.2.2. CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO

Uma das etapas mais importantes da modelagem hidrológica é a calibração do modelo. De acordo com Vestena (2008), a calibração é a obtenção dos parâmetros internos do modelo que representam as características da área modelada a partir de dados observados. É um processo cíclico que vai ajustando o modelo às características reais. Kobiyama e Manfroi (1999) ressaltam que a calibração é uma etapa indispensável e fortemente ligada ao monitoramento hidrológico. Segundo Collodel (2009), a calibração pode ser realizada manualmente

ou de forma automática. No primeiro caso, o próprio usuário modifica os valores dos parâmetros do modelo por tentativa e erro até encontrar valores que coincidam com os resultados observados. No segundo, funções objetivo são utilizadas para determinar os parâmetros por comparação entre dados simulados e observados. Nesse processo, algoritmos de otimização de busca são utilizados para encontrar valores ótimos para as funções objetivo. Os algoritmos de busca podem ser locais ou globais. A busca local é rápida e eficiente em situações em que exista apenas um ponto ótimo, já a global faz uma varredura mais abrangente, de maneira estocástica. Esse segundo tipo se ajusta mais apropriadamente aos propósitos dos modelos hidrológicos, destacando-se entre eles os algoritmos genéticos, que vem apresentando bons resultados na calibração desses modelos.

Verificação é o processo de conferência da validade dos parâmetros calibrados. Por meio de dados observados, distintos dos utilizados para calibração, é possível realizar simulações com o intuito de comprovar a representatividade dos parâmetros calibrados (HUBER e DICKINSON, 1988).

3.3. STORM WATER MANAGEMENT MODEL - SWMM

O modelo SWMM foi desenvolvido na década de 70 por Metcalf & Eddy, pela Universidade da Florida e pela Water Resource Engineers (WRE), sob patrocínio da United States Environmental Protection Agency (US EPA) e desde então passou por vários aperfeiçoamentos. É um modelo bastante difundido e de uso consolidado, utilizado em planejamento, análise e projetos ligados ao escoamento superficial e sistemas de drenagem, contemplando também aplicações voltadas a áreas não urbanas (ROSSMAN, 2010). É um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão que é utilizado primariamente, mas não exclusivamente, para áreas urbanas, para eventos únicos ou simulação contínua (LIDDG, 2005). Com base em dados de precipitação, dados meteorológicos e a partir das características da área estudada, gera valores de saída quanti e qualitativos (HUBER e DICKINSON, 1988).

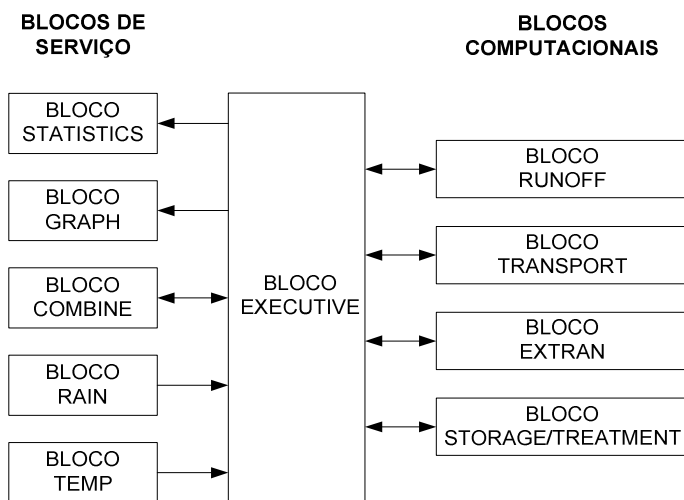
A versão atual do programa (5.0) proporciona um ambiente integrado para editar os dados de entrada da área de estudo, realizar simulações hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em uma variedade de formatos. Estes incluem áreas de drenagem codificadas por cores e mapas de sistemas de condução, gráficos e tabelas de séries históricas, plotagem de perfis e análise de frequências estatísticas. No que concerne à hidrologia, o modelo pode

levar em conta intensidades de chuva com variação temporal, acúmulo e derretimento de neve, evaporação, interceptação superficial, percolação, infiltração em camadas não saturadas, escoamento sub-superficial e propagação em reservatório não linear. Na parte hidráulica o modelo apresenta capacidade para manusear redes de tamanho ilimitado, aplicar métodos de propagação, modelar vários regimes de escoamento, aplicar condições externas de escoamento e parâmetros de qualidade, modelar unidades hidráulicas, de armazenamento, de tratamento e canais e condutos de formatos diversos. Em qualidade da água pode considerar a lixiviação de poluentes sobre o solo, propagar parâmetros de qualidade, variação da concentração de poluentes em unidades de tratamento, alterações dos parâmetros de qualidade em clima seco, entre outros (ROSSMAN, 2010).

Huber e Dickinson (1988) classificam o modelo como sendo discreto ou contínuo, concentrado, fisicamente baseado e numérico.

O programa é composto por blocos ou módulos, em um total de 10, sendo 6 deles classificados como blocos de serviço (Statistics, Graph, Combine, Rain, Temp e Executive) e os 4 restantes como bloco computacionais (Runoff, Transport, Extran e Storage/Treatment) (HUBER e DICKINSON, 1988). Os blocos e suas relações são mostrados na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Blocos que compõem o modelo SWMM e suas inter-relações.



Fonte: Adaptado de Huber e Dickinson (1988).

Os blocos computacionais são os módulos de cálculo responsáveis, por exemplo, pela transformação da precipitação em vazão, propagação e cálculo da carga de poluentes. Os módulos de serviço têm funções diversificadas, como análise de dados e apresentação de resultados (MELLER, 2004).

3.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS

De acordo com Huber e Dickinson (1988), os blocos apresentam as seguintes características:

3.3.1.1. BLOCO EXECUTIVE

Faz o controle e comunicação com os outros blocos. Funções: designar unidades lógicas e arquivos; controlar a sequência dos blocos computacionais; fazer a representação de arquivos para impressão; checar erros de entrada; controlar e sumarizar os erros de entrada e simulação.

3.3.1.2. BLOCO COMBINE

Amplia a capacidade de modelagem por fazer a combinação entre os dados de saída dos blocos. Possui as seguintes funções: arranjar diferentes arquivos de interface em um único arquivo; combinar hidrogramas e polutogramas de localizações diferentes em uma única série histórica; selecionar ou renumerar nós; apresentar informações básicas sobre arquivos de interface; converter arquivos de interface para diferentes formatos.

3.3.1.3. BLOCO STATISTICS

Responsável por análises estatísticas de dados. Pode realizar a separação de eventos dentro de uma série juntamente com sua magnitude, período de retorno, frequência e gráficos.

3.3.1.4. BLOCO RAIN

Faz a leitura de séries históricas de precipitação, realiza a análise de eventos e gera arquivos de interface para entrada no bloco Runoff.

3.3.1.5. BLOCO TEMP

Cria arquivos de dados de temperatura, evaporação e velocidade do vento, acessíveis ao bloco Runoff. Contém métodos de interpolação para preenchimento de falhas em séries históricas. A interpolação, contudo, não é ativada para falhas em períodos maiores que 2 semanas.

3.3.1.6. BLOCO GRAPH

Responsável pela saída de dados do programa. Está interligado aos blocos computacionais e Executive.

3.3.1.7. BLOCO EXTRAN

É o módulo de transporte estendido (Extended Transport). Modelo de resolução de sistemas de drenagem incorporado ao SWMM. Originado do WRE Transport Model. Na incorporação, manteve suas propriedades de análise hidráulica, tendo alguns recursos removidos, como algumas rotinas de cálculo que são executadas por outros módulos do programa.

3.3.1.8. BLOCO STORAGE/TREATMENT

Simula a propagação do escoamento e poluentes para uma unidade de tratamento/armazenamento em condições de clima seco ou úmido.

Pode conter até 5 unidades ou processos configurados de diversas maneiras. Calcula a remoção de poluentes de forma discreta ou contínua.

3.3.1.9. BLOCO RUNOFF

Responsável pela simulação quanti e qualitativa do escoamento. Por meio da entrada de dados de precipitação, o módulo calcula, passo a passo, perdas por infiltração em áreas permeáveis, retenção superficial, escoamento superficial, em canais no sistema de drenagem e derretimento de neve, resultando em hidrogramas e polutogramas

A bacia é representada como sendo um conjunto de sub-bacias idealizadas interligadas por condutos.

3.3.1.10. BLOCO TRANSPORT

Coordena a propagação de efluentes sanitários e poluentes através do sistema de esgotamento. Estima o escoamento em clima seco, a infiltração no sistema, a deposição de sedimentos e dimensiona tubulações.

3.3.2. APLICAÇÕES

Zaghloul (1983) aplicou o SWMM para determinar quais parâmetros são mais sensíveis na simulação envolvendo os módulos Runoff e Transport.

Os seguintes parâmetros foram testados: taxa de infiltração, profundidade de detenção, declividade do solo, coeficiente de Manning, porcentagem de impermeabilidade, largura representativa da bacia (módulo Runoff), comprimento do conduto, número de condutos em um dado comprimento, condição de sobrecarga, inclinação do conduto, Manning do conduto (módulo Transport).

Os testes foram feitos para cada parâmetro individualmente, alterando seus valores em uma determinada faixa (selecionada de acordo com valores práticos) e verificando sua influência em termos dados de saída específicos. Os outros parâmetros eram mantidos constantes em cada teste.

▪ Parâmetros do módulo Runoff:

A bacia modelada para esses testes é constituída de 25 sub-bacias retangulares idênticas com medidas de 1000x500 pés cada. A chuva utilizada tem formato triangular com pico de intensidade de 4 pol/hora e duração de 1 hora.

Taxa de infiltração: foram utilizados taxas múltiplas dos valores de 3 pol/hr e 0,52 pol/hr, ambas com taxa de decaimento com o tempo de 0,001151/s e porcentagem de superfícies impermeáveis de 50%. O resultado mostrou variação de 8% na vazão de pico e 25% no volume escoado superficialmente.

Profundidade de detenção: a faixa de valores utilizada varia de 0 a 4 vezes os valores padrões do modelo (0,062 pol para superfícies impermeáveis e 0,184 pol para superfícies permeáveis). O resultado mostrou variação de 9% na vazão de pico e 20% no volume escoado superficialmente.

Declividade do solo: faixa de 0,001 e 0,10. Uma grande variação na vazão de pico e volume escoado é obtida na faixa de declividade

entre 0,001 e 0,01 (0,01 é o valor padrão do SWMM) tendo redução significativa após esses valores, embora sempre apresente valor crescente com o aumento da declividade.

Coefficiente de rugosidade de Manning: os valores padrões do SWMM são 0,013 e 0,025 para superfícies impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Valores menores que os padrões tendem a apresentar uma variação maior na vazão e volume escoado.

Porcentagem de impermeabilidade: a vazão de pico e o volume escoado variam praticamente linearmente com a porcentagem de áreas impermeáveis diretamente conectadas.

Largura representativa: a faixa varia de 10 a 800% do valor de 707 pés calculado para a bacia. O resultado mostra que valores abaixo de 707 tendem a causar grande variação nos valores de vazão e volume escoado, enquanto valores maiores que o de referência apresentam variações mais suaves.

▪ Parâmetros do módulo Transport:

Realizados em uma única sub-bacia composta por uma série de condutos. A chuva utilizada é a mesma do módulo anterior.

Comprimento do conduto: variando na faixa de 1000 a 10000 pés. As vazões de pico obtidas foram de 24 a 14 pés cúbicos por segundo para os comprimentos de 1000 e 10000 pés respectivamente.

Número de condutos em um dado comprimento: 1, 2 e 4 condutos foram utilizados para propagar o mesmo hidrograma em cada um dos seguintes comprimentos: 1000, 2000 e 4000 pés. O resultado mostra que a vazão de pico diminui ligeiramente com o aumento do número de condutos.

Efeito da sobrecarga dos condutos: o terceiro conduto de uma série de 5 tem seu diâmetro diminuído para provocar o efeito de sobrecarga. O fenômeno provoca a alteração na vazão de pico, limitando-a a capacidade do conduto e causando um prolongamento da descarga acumulada.

Efeito da declividade do conduto: um conduto de 1000 pés foi utilizado com declividades variando de 0,1 a 10%. A alteração no pico de vazão foi pouco significativa.

Efeito do coeficiente de Manning do conduto: testado em condutos idênticos com Manning variando de 0,013 a 0,52. Os resultados apontaram para vazões de 23 a 19 pés cúbicos por segundo, respectivamente.

Jang *et al* (2007) compararam a utilização do SWMM nas bacias hidrográficas rurais coreanas de Seolmacheon, Weecheon e Pyungchang

com o método de hidrograma sintético de Clark e também verificaram diversas combinações dos métodos de Clark, SCS e dos modelos SWMM e ILLUDAS para condições de pré e pós-urbanização nos distritos de Noeun, Jinjeob, Yulha e Mulgeum.

Na comparação entre o SWMM e o método de Clark, o modelo SWMM foi aplicado para a condição não calibrada, utilizando valores sugeridos pelo manual do programa e valores da literatura, considerando a bacia como uma área única. Para cada uma das três bacias foram utilizados três conjuntos de dados observados. Os resultados das simulações mostram que o modelo SWMM apresenta melhor aproximação dos valores de vazão de pico que o modelo de Clark.

Nos casos dos distritos, os autores realizaram três simulações em cada área sempre comparando a combinação de uso de dois métodos de hidrograma sintéticos, um hidrograma sintético e um modelo com a utilização do SWMM para ambas as condições (pré e pós-urbanização). A utilização conjunta do SWMM para as duas condições sempre apresentou os resultados esperados de aumento do pico de vazão e diminuição do tempo de pico, comportamento esse que nem sempre foi observado nas outras combinações utilizadas.

3.4. HYDROLOGIC MODELING SYSTEM - HEC-HMS

O HEC-HMS é um modelo de chuva-vazão projetado para simular diversos fenômenos hidrológicos em bacias hidrográficas dendríticas (USACE-HEC, 2010). Foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), integrado ao United States Army Corps of Engineers (USACE). Atualmente encontra-se na versão 3.5 e apresenta um ambiente de trabalho integrado, incluindo base de dados, utilitários, mecanismos computacionais e ferramentas para visualização de resultados e geração de relatórios (USACE-HEC, 2000).

O programa agrega uma variada gama de métodos para modelar fenômenos como infiltração, escoamento básico, propagação do escoamento, armazenamento, entre outros. De acordo com USACE-HEC (2000), na modelagem dos fenômenos de chuva-vazão e propagação o programa apresenta os seguintes componentes:

- Entrada de dados de chuva observados, séries históricas hipotéticas ou eventos que representam o limite superior de precipitação possível de um dado local;
- Modelos de perda que estimam o escoamento gerado, descritas as propriedades da bacia;

- Modelos de escoamento direto que consideram o escoamento superficial, armazenamento e perdas de energia enquanto a água percorre a bacia até atingir os sistemas drenantes;
- Modelos de propagação do escoamento que consideram o armazenamento e fluxo de energia enquanto a água percorre os canais;
- Representação de confluências e bifurcações;
- Sistemas de contenção/detenção de água; e
- Ferramentas de calibração automática, que estima certos parâmetros do modelo a partir de dados observados.

É utilizado principalmente para geração de hidrogramas do fenômeno hidrológico estudado. Dessa maneira, é uma ferramenta que propicia dados para estudos nas áreas de drenagem urbana, previsão de vazão, impacto da urbanização futura, projetos de reservatórios, redução de danos causados por enchentes, entre outros (USACE-HEC, 2010).

3.4.1. COMPONENTES

Em uma simulação hidrológica da natureza deste trabalho, os seguintes componentes do modelo são utilizados:

- Modelo da bacia: componente principal do programa. É onde a bacia hidrográfica é representada, juntamente com seus elementos constituintes e os processos que nela ocorrem. Nessa representação são utilizadas várias ferramentas que, conectadas entre si, simulam os fenômenos que ocorrem em seu interior.
- Modelo meteorológico: componente de controle meteorológico. É onde são especificados as formas e os métodos de entrada de dados de precipitação na forma de chuva e/ou derretimento de neve e de evapotranspiração. Semelhantemente aos blocos de serviço do SWMM, é esse componente que aloca os dados para o modelo da bacia.
- Especificações de controle: nesse componente determinam-se as especificações de controle da simulação: seu início, fim e seu intervalo de cálculo.

3.4.2. APLICAÇÕES

Zarrielo (1998) apresentou o resultado da aplicação de nove modelos hidrológicos não calibrados em Harvard Gulch e Surrey Downs, duas pequenas bacias urbanas de clima e fisiografia distintas dos Estados Unidos. Os modelos foram aplicados por usuários experientes a partir de dados estimados, sendo os resultados comparados com dados observados.

A bacia de Surrey Downs tem 0,36 km² e tem grande parte da área ocupada por lotes residenciais unifamiliares. Cerca de 30% da área da bacia é impermeável. A bacia de Harvard Gulch tem 8,02 km² e uso do solo variado, 38% da área da bacia é impermeável.

Foram utilizados 6 eventos chuvosos em cada bacia, provenientes de estações localizadas em suas áreas. Além disso, conheciam-se as condições antecedentes dos solos.

Na simulação, o modelo HEC utilizou o método do SCS para perdas e Muskingum para propagação. Já o modelo SWMM utilizou os métodos de Horton e onda cinemática para perdas e propagação, respectivamente.

Os resultados de cada evento simulado foram comparados com dados medidos, em termos de pico de vazão. Na bacia de Harvard Gulch o modelo HEC apresentou resultados que variam de 3,6 a 1,4 vezes o valor medido, obtendo média de 2,5 vezes acima deste. O modelo SWMM apresentou resultados variando de 0,9 a 1,83 do valor medido, com média de 1,34 vezes acima deste. Na bacia de Surrey Downs o modelo HEC apresentou resultados que variam de 3 a 1,26 vezes o valor medido, com média de 1,42 vezes acima do mesmo. O modelo SWMM apresentou resultados que variam de 2 a 1,04 vezes o valor medido, com média de 1,54 vezes o dado observado.

Zhang e Johnson (2010) aplicaram o modelo na bacia hidrográfica do Rio Russo, no norte da Califórnia. Possui área de 3883 km² e é composta por florestas, campos agrícolas e áreas urbanas. Dois grandes reservatórios de água (Lago Sonoma e Lago Mendocino) juntamente com numerosos usos agrícolas e desvios do curso d'água principal alteraram a hidrologia natural da bacia. Seu relevo apresenta altitudes que variam de desde o nível do mar até 1365 m. A precipitação da bacia é bastante sazonal, com 80% do seu volume total ocorrendo entre os meses de Novembro a Março. A média anual de precipitação varia de 762 mm a 1270 mm, dependendo da localidade.

A discretização da bacia foi realizada com auxílio do HEC-GeoHMS e, devido ao grande número de elementos, a área de estudo teve de ser dividida em duas partes para aplicação do modelo. Uma das divisões apresentou um total de 619 sub-bacias e 463 canais, a outra contou com 671 sub-bacias e 485 canais. Devido à falta de dados, os reservatórios presentes na bacia não foram modelados. A bacia apresenta um total de 14 estações de medição de chuva, sendo os dados destas distribuídos por meio da aplicação do método dos polígonos de Thiessen.

O método do SCS foi utilizado para geração do hidrograma e cálculo de perdas. A propagação foi realizada pelo método de Muskingum e o escoamento básico foi obtido por calibração.

A aplicação do modelo utilizou dados de precipitação dos dias 12 a 16 de dezembro de 2002. A calibração foi realizada com os dados do United States Geological Survey (USGS).

Os resultados da aplicação foram apresentados em função do escoamento simulado e observado em cinco canais pertencentes à bacia. Em três desses elementos a simulação atingiu resultado satisfatório. Nos outros dois, a simulação superestimou as descargas de pico para um dos picos do hidrograma. Os autores concluem que, devido a limitação dos dados da bacia e de descarga/armazenamento dos reservatórios para uma bacia de estudo dessa magnitude, é necessário refinar a calibração do modelo.

3.5. DISCRETIZAÇÃO DA BACIA

A discretização é a etapa de segmentação da bacia em elementos que, interligados entre si, devem representar adequadamente os fenômenos hidrológicos que ocorrem em seu interior. Huber e Dickinson (1988, p.75) definem a discretização como sendo “um procedimento para a abstração matemática da área de drenagem física da bacia”.

Existem diversos estudos que procuram determinar quais os níveis mais adequados de discretização de uma bacia. Collodel (2009) afirma que seus resultados são contraditórios, uma vez que os diversos estudos existentes indicam comportamentos opostos.

A seguir serão apresentados alguns dos estudos que investigam os efeitos da discretização nas respostas da bacia.

Zaghloul (1983) aplicou o modelo SWMM em três diferentes áreas urbanas para avaliar os efeitos da discretização da bacia nos hidrogramas finais. Os resultados obtidos apontam que a diminuição do detalhamento das bacias tende a produzir um pico de vazão mais elevado. Em um dos casos, a resolução detalhada da bacia apresentou picos de vazão 20% menores que a resolução simplificada. Na obtenção desses resultados o autor simplificou o nível de detalhamento das bacias ponderando as características da simulação detalhada e aplicando-os na resolução simplificada.

Metcalf e Eddy *et al.* (1971, *apud* Huber e Dickinson, 1988) apresentam o efeito de discretização no hidrograma final para uma bacia urbana de Baltimore, Estados Unidos. Foram testados duas

configurações, compostas de 5 e 12 sub-bacias e comparados com dados observados. A configuração composta por 12 sub-bacias se aproximou mais dos máximos do hidrograma medido e apresentou picos mais elevados que a configuração simplificada. Em um dos picos de vazão do hidrograma final a configuração detalhada é 50% mais elevada que a configuração simplificada. Os autores afirmam que as diferenças entre as configurações podem ser ajustadas por calibração.

Lopes e Canfield (2004) testaram a influência do nível de discretização em uma bacia de 4,4 hectares de uma região semi-árida do estado de Arizona, Estados Unidos, utilizando o modelo Kineros2 para eventos de baixa e elevada precipitação. Foram utilizadas quatro representações da bacia. Para os eventos de reduzida precipitação, o volume escoado e o pico de vazão para a representação mais simples da bacia atingiram 75% dos valores para a representação detalhada. Para os eventos de elevada precipitação essa diferença foi mais acentuada, atingindo 45% dos valores da representação detalhada. Os autores afirmam que a maximização da infiltração e a redução do efeito de propagação que ocorrem com a simplificação da bacia são os fatores responsáveis pelos resultados obtidos.

Dankenbring e Mays (2009) utilizaram o Colorado Unit Hydrograph Procedure (CUHP) e o modelo SWMM para avaliar o efeito da discretização da bacia nos hidrogramas finais. As avaliações foram realizadas em uma bacia de 3,76 km² do estado do Colorado, Estados Unidos. A bacia foi dividida em 6 configurações, variando de 1 a 6 sub-bacias. As simulações foram realizadas para dois diferentes cenários de ocupação (utilizando 2,1 e 51,4% de áreas impermeáveis diretamente conectadas). Para o cenário com 2,1% de áreas impermeáveis, a vazão de pico da bacia com 6 elementos foi 2 vezes maior que a configuração mais simplificada. Para o outro cenário, a vazão de pico da configuração mais detalhada foi, em média, 1,2 vezes maior que a configuração composta por um elemento.

Os autores concluem que uma maior discretização da bacia causa um aumento no pico de vazão e que esse efeito é menos pronunciado em áreas com maior nível de urbanização. Também foi constatado que a discretização não afetou o volume escoado.

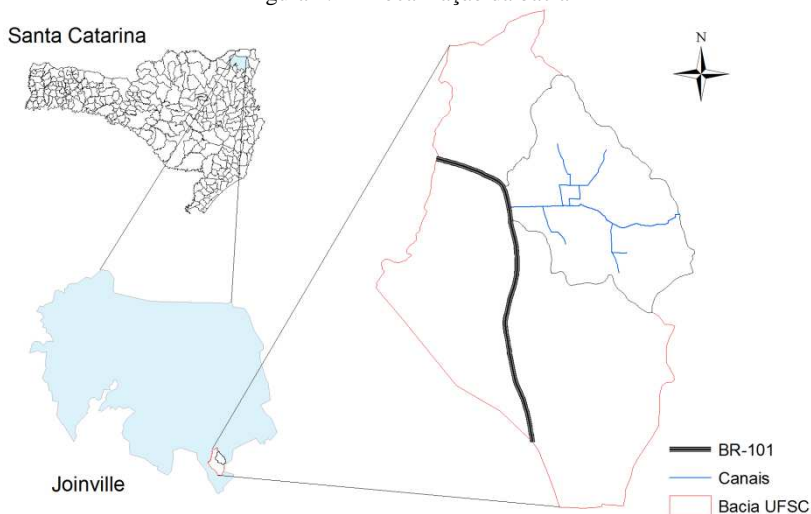
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma breve descrição da área de estudo e dos métodos utilizados para realização do estudo serão apresentados a seguir.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

A bacia de estudo está localizada na porção sul do município de Joinville, estado de Santa Catarina, às margens da BR-101, estando inserida na bacia que engloba a área de implantação do novo campus da UFSC em Joinville, conforme a Figura 4.1.

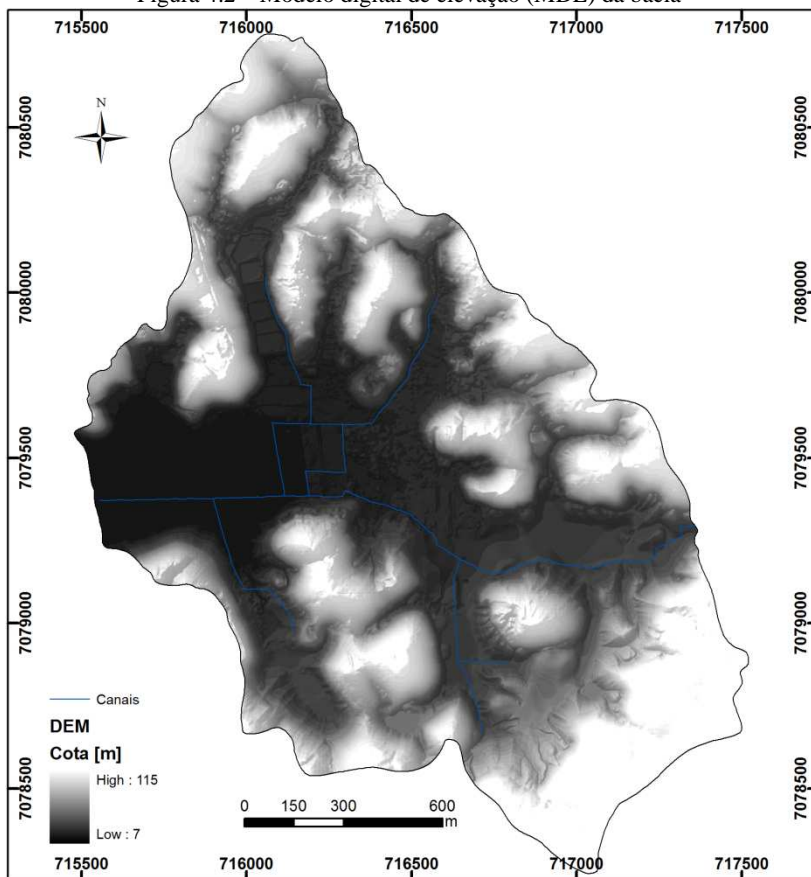
Figura 4.1 – Localização da bacia



Totalizando 2,76 km², apresenta grande parte de sua área com declividades suaves, tendo cotas variando de 7 a 115 m, como pode ser visualizado na Figura 4.2.

Pompêo (2010) realizou um estudo hidrológico para a região de implantação do campus da UFSC em Joinville. A delimitação da área aqui apresentada foi baseada em umas das bacias do referido estudo.

Figura 4.2 – Modelo digital de elevação (MDE) da bacia

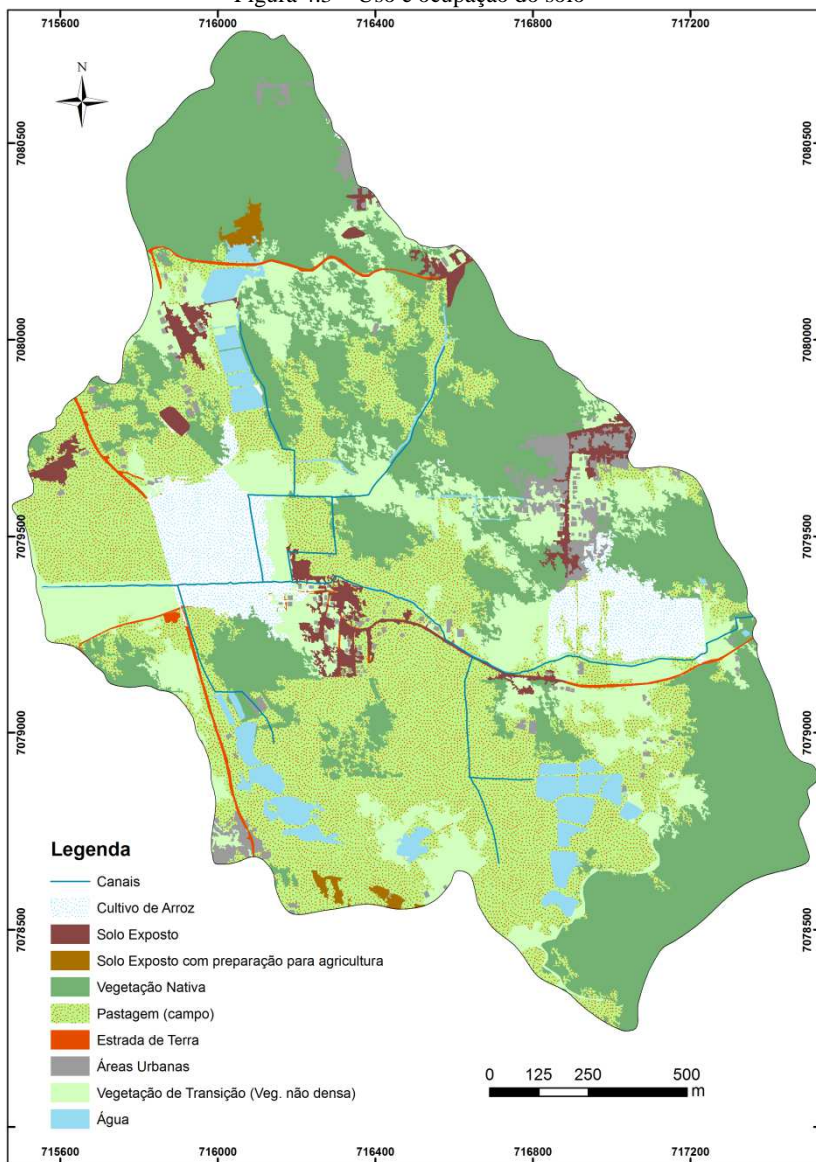


4.1.1. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A área de estudo apresenta uma mescla de características rurais com naturais, como pode ser visto na Figura 4.3.

O mapa de uso e ocupação do solo para a região de implantação do campus da UFSC (que contém a área de estudo) foi elaborado pelo Laboratório de Hidrologia (LABHIDRO), na ocasião de realização do estudo hidrológico citado em 4.1. A parcela de cada tipo de uso do solo é apresentada na Tabela 4.1.

Figura 4.3 – Uso e ocupação do solo



Fonte: Adaptado de LABHIDRO

Tabela 4.1 – Uso e ocupação do solo para a bacia de estudo

Uso	Área [km ²]	Parcela [%]
Estrada de Terra	0,0323	1,17
Áreas Urbanas	0,0755	2,74
Pastagem (campo)	0,8931	32,35
Vegetação de Transição	0,4598	16,66
Vegetação Nativa	0,9342	33,84
Cultivo de Arroz	0,1697	6,15
Solo exposto	0,0697	2,53
Solo Exposto (preparo para agricultura)	0,0120	0,44
Água	0,1142	4,14

4.1.2. SISTEMA HÍDRICO

Para delimitação dos canais da bacia e obtenção das medidas de suas seções transversais foi realizada uma saída de campo no dia 26 de outubro de 2011.

A delimitação dos canais foi baseada em um levantamento aerofotogramétrico do município de Joinville, obtido por meio da Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão de Joinville (SEPLAN), nos pontos percorridos e referenciados durante a saída de campo e na base cartográfica estadual disponibilizada pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI). A Figura 4.4 ilustra os diversos canais considerados para aplicação deste trabalho. Salienta-se que os canais que estão localizados além dos pontos percorridos em campo (tracejados, na Figura 4.4) foram delimitados com o auxílio das imagens áreas mencionadas. Sua localização, portanto, não é precisa, uma vez que esses canais são de pequenas proporções. Isso afeta muito pouco a aplicação do modelo, uma vez que os mesmos serão considerados parte das bacias na modelagem, não tendo propagação ocorrendo ao longo da sua extensão, diferentemente dos outros canais medidos. Além disso, para estimativa de parâmetros que necessitam do traçado desses canais (como o tempo de concentração, dependente do talvegue) foi também utilizado o traçado dos canais naturais gerados por software de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O esquema das medidas das seções obtidas em campo é apresentado na Figura 4.5. Esses valores para cada seção se encontram na Tabela 4.2.

Figura 4.4 – Esquema dos canais principais da bacia

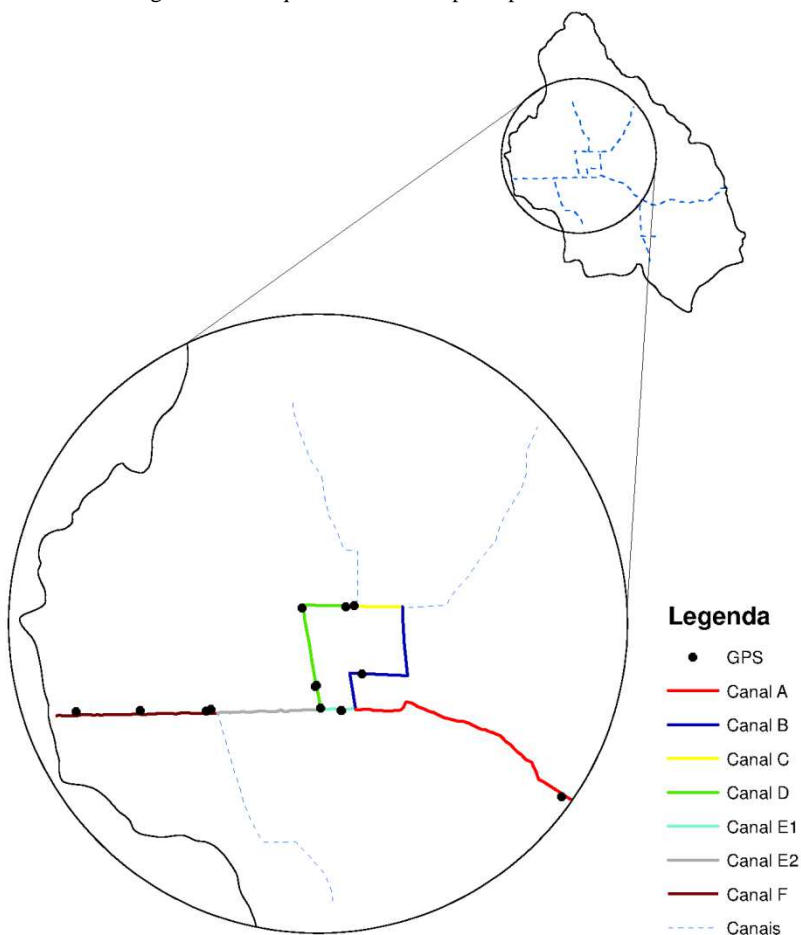


Figura 4.5 – Dimensões medidas das seções

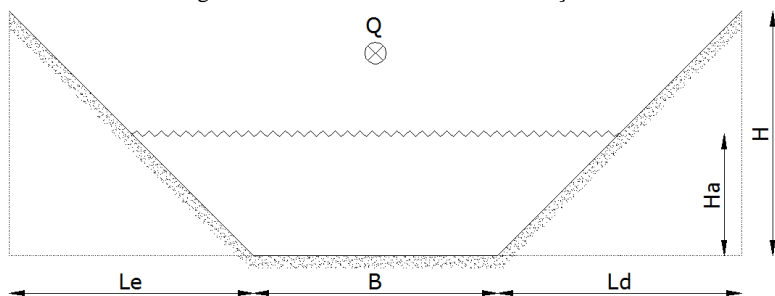


Tabela 4.2 - Medidas das seções transversais dos canais

Seção	B [m]	H [m]	Ha [m]	Le [m]	Ld [m]
A	2	1,3	0,15	0,9	0,9
B	0,5	0,75	0,05	0	0,65
C	1,4	1,41	0,25	2,25	0
D	1,35	1,26	0,25	0	0
E	1,45	1,8	0,35	2,4	2,4
F	3,2	1,65	0,17	0,55	3,6

4.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Neste tópico serão apresentados sucintamente os processos, considerações ou métodos utilizados pertencentes aos modelos de maior relevância para este trabalho.

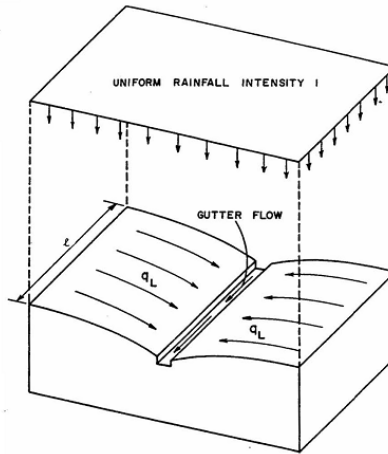
4.2.1. SWMM

Um maior detalhamento das questões aqui abordadas é apresentado por Huber e Dickinson (1988).

4.2.1.1. REPRESENTAÇÃO DAS SUB-BACIAS

O modelo considera cada sub-bacia como um elemento ideal, no formato retangular, em que o escoamento superficial gerado converge para um elemento de drenagem central, conforme a Figura 4.6. Na figura, qL é a vazão superficial por unidade de largura da bacia. A largura representativa da sub-bacia, na prática, é difícil de conceber, uma vez que bacias reais têm formas irregulares. No modelo, essa medida é um valor que representa o somatório de todas as distâncias perpendiculares ao escoamento superficial dirigido ao elemento drenante central.

Figura 4.6 - Representação da bacia idealizada no modelo.



Fonte: Huber e Dickinson (1988).

Na representação da bacia idealizada, a largura é:

$$W = 2 \cdot l \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Em que:

- W : largura representativa da bacia [L]
- l : comprimento do canal [L]

A vazão por unidade de largura é:

$$qL = \frac{Q}{W} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Em que:

- qL : vazão por unidade de largura [$L^3 \cdot T^{-1} \cdot L^{-1}$]
- Q : escoamento superficial [$L^3 \cdot T^{-1}$]

Como supracitado, na prática as bacias reais diferem do modelo idealizado, então, encontrar a largura representativa torna-se uma tarefa mais complexa. Uma boa estimativa inicial desse parâmetro é encontrar a maior distância em que ocorre o escoamento superficial ou um valor médio e dividir o valor da área da bacia por essa estimativa.

Digiano *et al.*, (1977, *apud* Huber e Dickinson, 1988) apresentam um método de ponderação para bacias irregulares, como a representada na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Bacia irregular para cálculo da largura representativa.



Fonte: Huber e Dickinson (1988).

Para essa situação o parâmetro é estimado por ponderação das áreas por meio da (Eq. 4.3):

$$W = \left(2 - \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \right) \cdot l \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Em que:

- A_i : área do lado i do canal de drenagem [L^2]
- l : comprimento do canal [L]

Para esse método, quando as duas áreas são idênticas tem-se a representação ideal da bacia, com a largura sendo o dobro do comprimento do canal de drenagem. No outro extremo, quando uma das áreas é nula, a largura corresponde ao comprimento l do canal.

Outro método que pode ser utilizado para estimar a largura equivalente da bacia é o método do retângulo equivalente, definido pelas seguintes relações, segundo Garcia (2005):

$$le = \frac{k_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Em que:

- le = largura do retângulo equivalente [L]
- P = perímetro da sub-bacia [L]
- A = área da sub-bacia [L^2]
- k_c = coeficiente de compacidade.

O coeficiente de compacidade é:

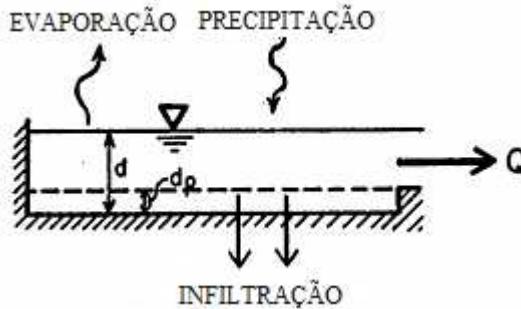
$$k_c = 0,282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

4.2.1.2. ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial é a vazão que escoar sobre a superfície do terreno como resultado direto da precipitação efetiva. Em termos de estudos hidrológicos, sua estimativa tem importância crucial, uma vez que é ela a responsável pelo aumento súbito da vazão observada em elementos de drenagem em eventos chuvosos.

No modelo, é calculada pelo bloco Runoff considerando o balanço hídrico para cada sub-área dentro da sub-bacia (parcela permeável e parcela impermeável) considerando esta como um reservatório não-linear, conforme a Figura 4.8.

Figura 4.8 – Representação da bacia como um reservatório não-linear.



Fonte: Adaptado de Huber e Dickinson (1988)

Para cada sub-área, estima-se a vazão pela equação da continuidade:

$$\frac{dV}{dt} = As \cdot \frac{dd}{dt} = As \cdot i_e - Q \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Em que:

- $V = A \cdot d$: volume de água na sub-bacia [L^3]
 - t : tempo [T]
 - d : lâmina de água [L]
 - As : área da sub-área [L^2]
 - i_e : intensidade de precipitação efetiva = precipitação – perdas [$L \cdot T^{-1}$]
 - Q : escoamento superficial [$L^3 \cdot T^{-1}$]
- O escoamento superficial é gerado pela equação de Manning:

$$Q = W \cdot \frac{K}{n} \cdot \left(d - d_p \right)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Em que:

- W : largura representativa da bacia [L]
- n : coeficiente de rugosidade de Manning
- d_p : lâmina de água armazenada em depressões [L]
- K : coeficiente de conversão de unidades
- S : declividade da bacia [$L \cdot L^{-1}$]

Combinando as equações resulta na representação dor reservatório não-linear:

$$\frac{dd}{dt} = i_e - W \cdot \frac{K}{n} \cdot \left(d - d_p \right)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Pela resolução da (Eq. 4.8) para cada intervalo de tempo obtém-se o escoamento superficial.

A vazão em canais e tubulações é calculada de maneira análoga, combinando as equações da continuidade e Manning e assumindo que os elementos representam reservatórios não-lineares.

4.2.1.3. PROPAGAÇÃO DO ESCOAMENTO

A propagação do escoamento é a sua transposição de uma determinada condição em determinado local para uma nova condição e local. Essa transposição não deve somente deslocar o objeto de um ponto ao outro, mas também considerar as modificações que sofre no percurso. Dessa maneira, pode ser dividido em dois processos principais: translação e atenuação. A translação é o deslocamento temporal. A atenuação é o efeito da mudança das condições de distribuição da vazão ao longo do trajeto.

A propagação do escoamento pode ser calculada no modelo por três métodos: escoamento permanente, onda dinâmica e onda cinemática, sendo este último o método empregado neste trabalho.

4.2.1.3.1. Escoamento permanente

Apenas translada o escoamento no tempo, não atenuando o hidrograma à montante para o ponto de jusante, isto é, o hidrograma que adentra um elemento sujeito à propagação por esse método se mantém inalterado.

4.2.1.3.2. Onda dinâmica

Realiza a propagação propriamente dita do escoamento (translação e atenuação) por meio da solução completa das equações de St. Venant.

As equações de St. Venant são obtidas pelas equações do *momentum* e da continuidade. A equação do *momentum* é:

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)}_{\text{Inércia}} + \underbrace{g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{Pressão}} = \underbrace{g \cdot A \cdot S_o}_{\text{Gravidade}} - \underbrace{g \cdot A \cdot S_f}_{\text{Atrito}} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Em que:

- Q : vazão [$L^3.T^{-1}$]
- A : área [L^2]
- t : tempo [T]
- g : aceleração da gravidade [$L.T^{-2}$]
- S_o : inclinação do canal [$L.L^{-1}$]
- S_f : inclinação da linha de energia [$L.L^{-1}$]

A equação da continuidade é:

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = q_L \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Em que:

- A_w : área molhada [L^2]
- Q : vazão [$L^3.T^{-1}$]
- t : tempo [T]
- l : distancia longitudinal [L]
- q_L : contribuição lateral por largura [$L^3.T^{-1}.L^{-1}$]

4.2.1.3.3. Onda cinemática

De maneira análoga à onda dinâmica, esse método realiza a propagação do escoamento por meio das equações de St. Venant. Contudo, diferencia-se daquele por se utilizar de uma forma simplificada da equação do *momentum*.

4.2.1.4. INFILTRAÇÃO

A infiltração é um dos principais processos de perdas (subtração da precipitação), representando a água que infiltra na superfície do solo

em direção às camadas inferiores. É função das características do solo e das suas condições de umidade quando na ocorrência do evento.

Existem três métodos de infiltração no modelo: Horton, Green-Ampt e SCS Curve Number, sendo este último o empregado nas simulações.

4.2.1.4.1. Método de Horton

Representa a infiltração por meio de uma equação empírica em que a taxa de infiltração decresce exponencialmente no tempo a medida que o evento tem continuidade. O método parte da seguinte definição:

$$F_p = F_\infty + (F_o - F_\infty) \cdot e^{-\alpha t} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Em que:

- F_p : capacidade de infiltração do solo [$L.T^{-1}$]
- F_∞ : capacidade mínima de infiltração – quando $t \rightarrow \infty$ [$L.T^{-1}$]
- F_o : capacidade máxima de infiltração – quando $t = 0$ [$L.T^{-1}$]
- t : tempo [T]
- α : coeficiente de decaimento [T^{-1}]

A (Eq. 4.11) é a base do método, contudo, ajustes são realizados para evitar que a taxa de infiltração exceda a incidência de precipitação, assim:

$$F_{pr}(t) = \min(F_p(t), i(t)) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Em que:

- $F_{pr}(t)$: capacidade de infiltração verdadeira no tempo t [$L.T^{-1}$]
- $F_p(t)$: capacidade de infiltração no tempo t [$L.T^{-1}$]
- $i(t)$: intensidade de precipitação no tempo t [$L.T^{-1}$]

4.2.1.4.2. Método de Green-Ampt

Considera que o solo é separado em duas camadas: uma, saturada, na parte superior e outra abaixo com uma quantidade inicial de umidade. As camadas são separadas por uma frente de umedecimento.

O modelo aplica o método de Green-Ampt considerando as modificações realizadas por Mein e Larson, resultando nas seguintes formulações:

Para $F < F_s$: $f = i$ e

$$F_s = \frac{S \cdot IMD}{\frac{i}{K_s} - 1} \quad \text{para } i > K_s \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Para $F \geq F_s$: $f = f_p$ e

$$f_p = K_s \left(1 + \frac{S \cdot IMD}{F} \right) \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Em que:

- f : taxa de infiltração [L.T-1]
- f_p : capacidade de infiltração [L.T-1]
- i : intensidade de chuva [L.T-1]
- F : infiltração acumulada [L]
- F_s : infiltração acumulada necessária para causar saturação [L]
- S : sucção de capilaridade média na frente de umedecimento [L]
- IMD : déficit inicial de umidade [L.L⁻¹]
- K_s : condutividade hidráulica saturada do solo [L.T⁻¹]

A (Eq. 4.14) é a formulação inicial de Green-Ampt, que considera que o solo está sempre saturado, a (Eq. 4.13) é a modificação apresentada por Mein e Larson, que prediz a infiltração quando o solo não atingiu o nível de saturação. Nesse caso, a infiltração se iguala a intensidade de precipitação e o volume de água necessário para causar a saturação do solo é constantemente verificado por meio de F_s (exceto quando $i < K_s$, situação em que todo o volume precipitado se infiltra e altera o valor de IMD). Quando o volume infiltrado se iguala ao volume de saturação, a formulação de Green-Ampt passa a atuar.

4.2.1.4.3. Método do SCS Curve Number

Calcula a precipitação efetiva em função da precipitação acumulada, uso e ocupação dos solos e das condições antecedentes de umidade através da equação:

$$Pe = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Em que:

- Pe : precipitação efetiva acumulada [L]
- P : precipitação acumulada [L]
- I_a : perda inicial [L]

- S : retenção potencial máxima [L]

A perda inicial representa as perdas por armazenamento. Somente após o preenchimento dessa parcela é que pode haver escoamento superficial. O método sugere que I_a seja uma parcela de S , conforme a relação abaixo:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (\text{Eq. 4.16})$$

A retenção potencial máxima é a capacidade máxima de armazenamento da bacia. É função do número de deflúvio CN :

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

A (Eq. 4.17) é válida para unidades SI, em que:

- S : retenção potencial máxima, em mm [L]
- CN : número de deflúvio

O número de deflúvio é um coeficiente que expressa as características de permeabilidade do solo, tendo valores tabelados.

4.3. HEC-HMS

Diferentemente do modelo SWMM, o HEC-HMS não tem uma representação idealizada da sub-bacia.

Como mencionado anteriormente, esse modelo contém uma grande quantidade de métodos para representar os fenômenos hidrológicos. Assim, diversas são as possibilidades de representar os fenômenos de perdas e propagação. Como serão utilizados os mesmos métodos que o modelo anterior para esses processos, neste tópico será descrito apenas como é considerado e qual o método de transformação do escoamento superficial utilizado neste modelo.

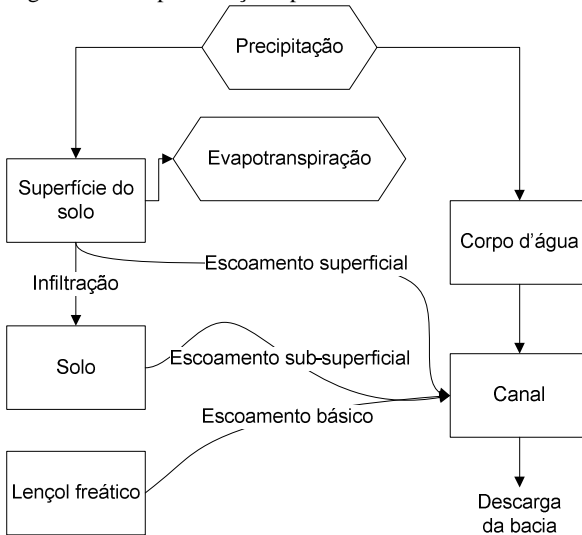
Um maior detalhamento dos tópicos aqui abordados pode ser encontrado em USACE-HEC (2000).

4.3.1.1. ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Além do escoamento superficial, o modelo tem componentes para representação do escoamento básico, sub-superficial e em canais, implementando-os conforme a Figura 4.9.

Para este trabalho, o método de obtenção do escoamento direto de interesse é o hidrograma unitário do SCS.

Figura 4.9 – Representação típica do escoamento no modelo



Fonte: Adaptado de USACE-HEC (2000)

Como esse modelo é composto de vários métodos, sua classificação deve ser aplicada a cada método utilizado. Para o presente trabalho, o modelo pode ser classificado como sendo, segundo USACE-HEC (2000), de simulação discreta e concentrado em todos os métodos utilizados, como empírico e de parâmetros ajustado para os métodos do SCS e como conceitual e de parâmetros medidos para a propagação por onda cinemática.

4.3.1.1.1. HIDROGRAMA UNITÁRIO DO SCS

O Hidrograma Unitário (HU) do SCS foi desenvolvido para bacias rurais dos Estados Unidos a partir da compilação de diversos hidrogramas medidos. É um hidrograma adimensional, formado a partir da vazão de pico e do tempo de ascensão do hidrograma.

No método, a vazão de pico é definida por:

$$Qp = \frac{Pe}{4,8} \cdot \frac{A}{tp} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Em que:

- Qp : vazão de pico unitária, em m^3/s [$\text{L}^3 \cdot \text{T}^{-1}$];
- Pe : precipitação efetiva unitária, em mm [L];
- A : área da bacia, em km^2 [L^2]; e

- ta : tempo de ascensão em horas [T].

O tempo de ascensão é o tempo que decorre do início da precipitação efetiva até o pico do hidrograma, sendo definido por:

$$ta = \frac{td}{2} + lag \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Em que:

- td : tempo de duração da precipitação efetiva [T]; e
- lag : tempo de retardo [T].

O tempo de retardo, por sua vez, representa a resposta da bacia ao evento. Por definição é o intervalo entre o centróide da precipitação efetiva até o pico de vazão do hidrograma. O SCS sugere a seguinte relação para sua obtenção:

$$lag = 0,6 \cdot tc \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Em que:

- tc : tempo de concentração da bacia [T].

4.4. DADOS HIDROLÓGICOS

Os dados hidrológicos utilizados são provenientes da estação pluviométrica Joinville (RVPSC), código 02648014. A estação é de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e operada pela EPAGRI, estando localizada nas coordenadas 26°19'18" S e 48°50'47" O, na cota 6 m. A série histórica apresenta dados compreendidos entre os anos de 1930 a 2011.

Para estimativa dos máximos de precipitação foi utilizado o método de Gumbel, seguido da desagregação de chuvas para determinação das curvas de intensidade, duração e frequência.

O método de Gumbel é fundamentado numa distribuição probabilística de extremos conforme a relação:

$$p = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

Em que:

- p : probabilidade de ocorrer um evento de maior ou mesma magnitude que outro com determinado período de recorrência.
- Y : variável reduzida.

Séries históricas de máximos diários de precipitações registradas anualmente podem ser utilizadas para obter a distribuição de Gumbel. A série de dados utilizada é apresentada na Tabela 4.3, totalizando 58 registros.

Para montagem dessa série foram desconsiderados os anos contendo falhas, excetuando-se os anos de 1966, 1969 e 1994 que, embora estejam desprovidos de registros em um dos meses do ano, marcaram, no restante do intervalo medido, elevadas precipitações (153,3 mm, 125 mm, 128 mm, respectivamente), acima da média dos valores de precipitações máximas diárias para o intervalo de dados selecionados, excluindo-se esses três anos (77,4 mm). A rigor, todo intervalo de dados com falhas deveria ser descartado (pois existe a probabilidade de justamente no intervalo falho estar localizada a precipitação mais elevada) ou ser preenchido por estimativa com base em dados de estações próximas utilizando um dos vários métodos existentes para tal necessidade. Contudo, para os fins deste trabalho julgou-se poder desconsiderar essas medidas. Além do mais, a opção de incluir intervalos falhos com precipitações acima do valor médio em vez de descartá-los gera estimativas de precipitação mais elevadas, obtendo-se assim um cenário mais pessimista em termos de eventos chuvosos.

Tabela 4.3 – Precipitações máximas diárias registradas na estação 02648014

Ano	P[mm]	Ano	P[mm]	Ano	P[mm]
1940	81,7	1959	40,4	1987	82,8
1941	97,3	1960	61,5	1988	66
1942	111,7	1961	60,5	1989	63
1943	73,6	1962	65,8	1990	54,2
1944	42,6	1963	43	1993	104,7
1945	42,2	1964	29,1	1994	128
1946	43,8	1966	153,3	1995	93,9
1947	56	1967	112	1996	90,2
1948	65,4	1968	105,4	1997	75,6
1949	28,6	1969	125	1998	112
1950	44,2	1970	60,5	1999	79,6
1951	33,6	1971	102	2000	82,9
1952	94,4	1972	84	2001	107,4
1953	31,4	1973	198	2002	46
1954	58,6	1974	124	2006	70
1955	55,5	1975	148	2007	73
1956	35,2	1977	124,6	2008	172
1957	48,2	1978	70	2009	166
1958	46,2	1979	38	2010	110
		1980	52		

A partir desses dados é possível ajustar a série aos valores à distribuição de Gumbel por meio da aplicação das equações:

$$P_d = \bar{P}_d + \left(Y - Y_n \right) \cdot \frac{S}{S_n} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Em que:

- P_d : precipitação diária máxima esperada para um determinado período de retorno [L].
- \bar{P}_d : média das precipitações máximas diárias [L]
- Y : variável reduzida [L]
- Y_n : média da variável reduzida [L]
- S : desvio padrão das precipitações máximas diárias [L]
- S_n : desvio padrão da variável reduzida [L]

A variável reduzida é determinada pela relação:

$$Y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{Eq. 4.23})$$

Em que:

- T : período de retorno [T]

A média dos valores de precipitações máximas diárias para os 58 anos de dados é 80,4 mm, tendo desvio padrão de 38,8 mm. Y_n e S_n são valores tabelados em função do número de amostras. Nesse caso, a variável reduzida tem valor de 0,55146 mm e seu desvio padrão de 1,17218 mm.

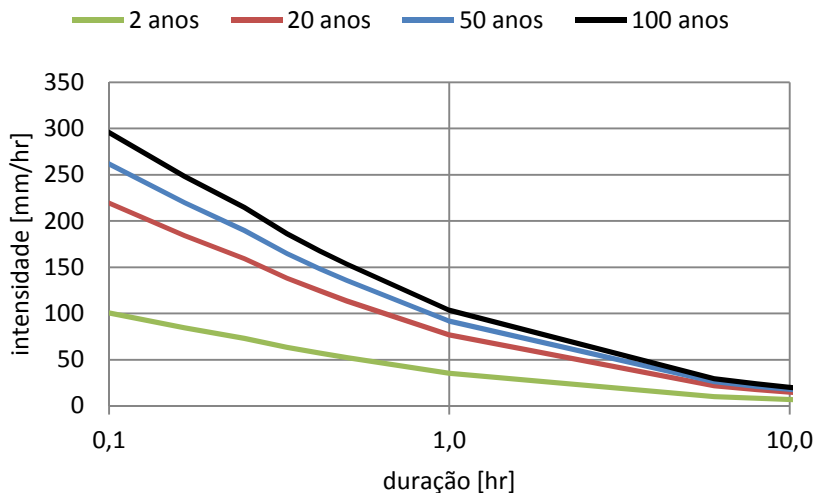
4.4.1. CURVAS DE INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA

Do método de Gumbel resultam as estimativas de precipitação máxima diária. Realizando-se a desagregação desses valores para diferentes períodos de retorno são obtidas as curvas de intensidade, duração e frequência.

As curvas de intensidade, duração e frequência relacionam a intensidade e a duração de um evento com um determinado período de retorno. São utilizadas para projeção de eventos chuvosos hipotéticos.

A Figura 4.10 apresenta essas curvas para os períodos de retorno de 2, 20, 50 e 100 anos.

Figura 4.10 - Curvas de intensidade, duração e frequência



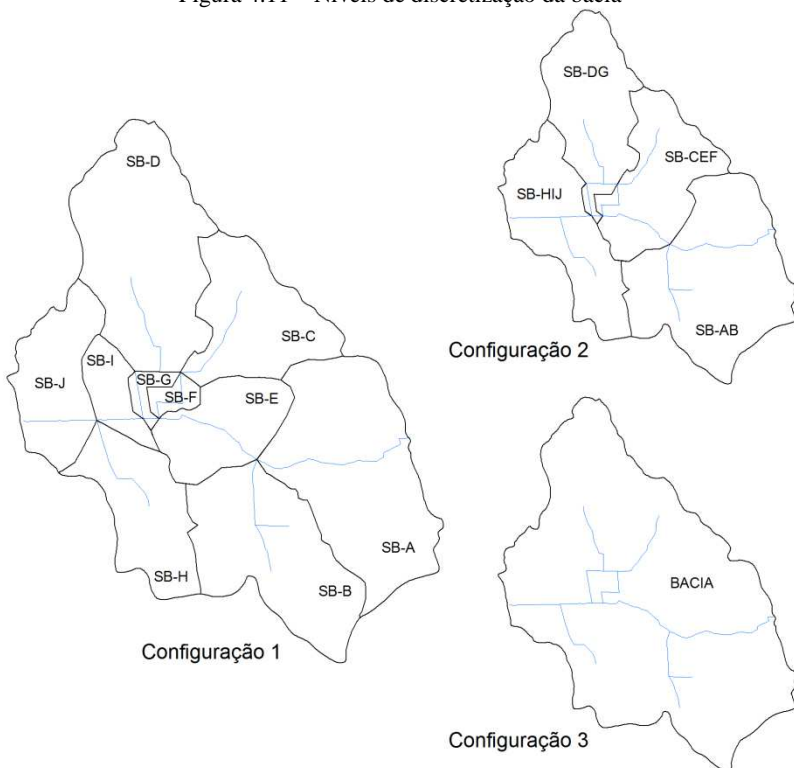
4.5. APLICAÇÃO DO MODELO

A aplicação do modelo será dividida em três etapas: discretização da bacia, levantamento dos dados requeridos e determinação da chuva de projeto.

4.5.1. DISCRETIZAÇÃO DA BACIA

Para comparar as respostas dos modelos, a bacia foi dividida em três diferentes configurações, conforme a Figura 4.11.

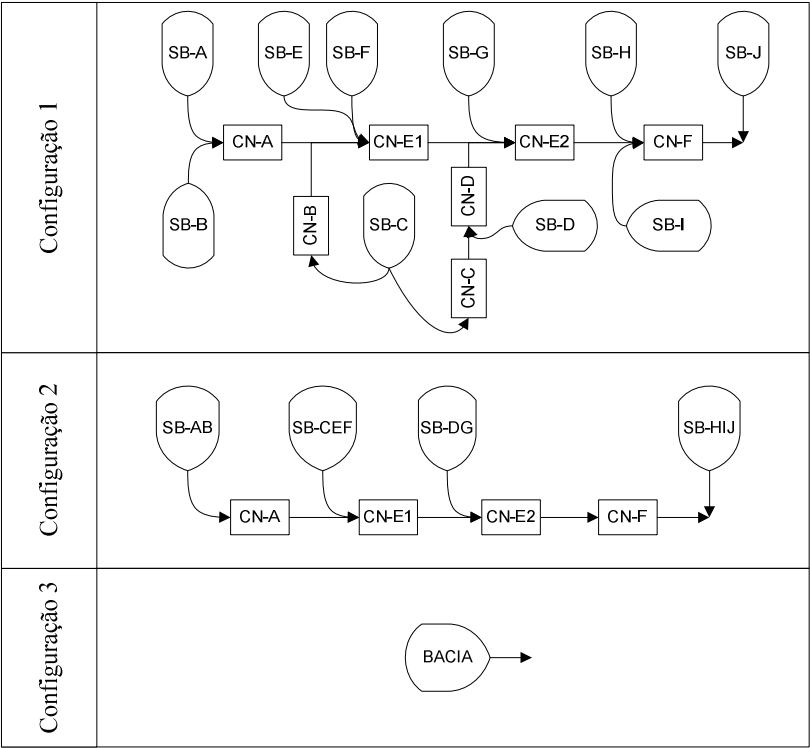
Figura 4.11 – Níveis de discretização da bacia



A configuração 1 é a mais detalhada, contendo 10 sub-bacias e 7 canais. A configuração 2 surgiu da agregação de algumas sub-bacias da configuração 1, resultando em 4 sub-bacias e 4 canais. Por último, a configuração 3 considera a bacia como um único elemento.

A relação de fluxo entre os elementos para as configurações adotadas pode ser visualizada na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Relações de fluxo entre as configurações



4.5.2. DADOS REQUERIDOS

Esta etapa consiste em obter os dados necessários para a aplicação dos modelos.

4.5.2.1. SWMM

Os dados necessários para aplicação do modelo referem-se aos elementos que representam a bacia: sub-bacias, junções e conduitos, vistos a seguir.

4.5.2.1.1. Sub-bacias

São os elementos principais da simulação hidrológica, representando o lugar geográfico onde a chuva incide e drena para um

ponto de saída. No modelo, a saída das sub-bacia pode ser uma junção ou outra sub-bacia.

As sub-bacias são divididas em duas áreas: uma permeável e outra impermeável. A primeira sofre ação da infiltração, a segunda não. A área impermeável pode ser ainda dividida em duas parcelas: uma que apresenta armazenamento em depressão e outra que não.

Os principais dados requeridos para as sub-bacias são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Informações requeridas para o elemento sub-bacia

Dado	Descrição	Unidade
<i>Area</i>	Área do elemento sub-bacia	ha
<i>Width</i>	Largura representativa da sub-bacia	m
<i>% Slope</i>	Declividade média da sub-bacia	%
<i>% Imperv</i>	Porcentagem de área impermeável	%
<i>N-Imperv</i>	Coefficiente de Manning para a área impermeável	-
<i>N-Perv</i>	Coefficiente de Manning para a área permeável	-
<i>Dstore-Imperv</i>	Armazenamento em depressões para área impermeável	mm
<i>Dstore-Perv</i>	Armazenamento em depressões para área permeável	mm
<i>%Zero-Imperv</i>	Porcentagem de área impermeáveis sem armazenamento em depressões	%
<i>Subarea Routing</i>	Forma de propagação no interior da sub-bacia	-
<i>Percent Routed</i>	Porcentagem do escoamento superficial propagado	%
<i>Infiltration</i>	Modelo de infiltração	-

A estimativa do parâmetro largura representativa da bacia foi realizada seguindo-se o sugerido por Huber e Dickinson (1988): dividir a área da bacia pela média de vários valores medidos do escoamento superficial. Para esse último também será respeitado o limite de 150 m estabelecido por Rossman (2009). Segundo esse autor, 150 m é o valor máximo em que ocorre escoamento superficial em bacias rurais, pois, nesses ambientes, a partir dessa distância o escoamento geralmente encontra pequenos canais e não pode mais ser considerado superficial.

A impermeabilidade diretamente conectada é estimada por meio do uso e ocupação do solo. Nem todas as áreas impermeáveis devem ser agregadas a esse parâmetro. Ele se refere apenas às áreas em que o escoamento gerado é conectado diretamente ao sistema de drenagem. Sendo assim, áreas impermeáveis que encaminham o escoamento para regiões permeáveis, onde ocorrem perdas, não fazem parte desse grupo.

Para a área de estudo não foram encontradas superfícies impermeáveis dessa natureza.

O coeficiente de rugosidade de Manning para superfícies é estimado de acordo com a Tabela 4.5. Valores desse coeficiente para regiões outras que canais são pouco conhecidos e confiáveis, em decorrência da grande variação das características das mesmas no espaço.

Tabela 4.5 – Coeficientes de Manning para superfícies.

Superfície	n	Superfície	n
Asfalto liso	0,011	Pastagem natural	0,13
Concreto liso	0,012	Gramíneas	
Revestimento comum de concreto	0,013	<i>curta, prado</i>	0,15
Pedregulho argamassado	0,024	<i>densa</i>	0,24
Solo sem cultivo	0,05	<i>capim bermuda</i>	0,41
Solos cultivados		Floresta	
<i>Cobertura residual < 20%</i>	0,06	<i>Arbustiva esparsa</i>	0,40
<i>Cobertura residual > 20%</i>	0,17	<i>Arbustiva densa</i>	0,80

Fonte: Adaptado de McCuen et al. (1996) apud Rossman (2010).

O armazenamento em depressões representa uma perda inicial ocasionada pelo acúmulo de água em depressões do terreno e por interceptação. Apresenta comportamento específico para superfícies permeáveis e impermeáveis. Nas primeiras, o acúmulo sofre influência da evaporação e da infiltração, na segunda apenas da evaporação. Uma parcela das superfícies impermeáveis pode ter armazenamento em depressões considerado nulo para gerar escoamento imediato. Valores desse parâmetro podem ser estimados a partir da Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Valores de armazenamento em depressões para coberturas.

Cobertura	Armazenamento [mm]	Cobertura	Armazenamento [mm]
Impermeável	1,27 – 2,54	Pastagem	5,08
Gramado	2,54 – 5,08	Serrapilheira	7,62

Fonte: Adaptado de ASCE (1992) apud Rossman (2010).

Como a infiltração é calculada explicitamente, para áreas permeáveis pode ser mais apropriado considerar o armazenamento em depressões como uma perda por interceptação com base na vegetação. Dessa maneira, esse parâmetro foi estimado com base nos usos do solo.

A declividade da bacia é a inclinação média da bacia medida em relação ao escoamento superficial. É a razão entre a diferença de cotas entre os pontos de início e fim do escoamento sobre a distância percorrida nesse trajeto. Pode ser estimada pela ponderação entre vários trajetos ou pode ser extraído de uma situação representativa para o elemento de sub-bacia. Para o presente caso utilizou-se a primeira sugestão.

A propagação em sub-áreas é uma forma de propagação interna do elemento sub-bacia, permitindo a ocorrência fenômeno entre áreas permeáveis e impermeáveis. Para esse parâmetro existem três alternativas:

- *Imperv*: o escoamento flui das áreas permeáveis para as áreas impermeáveis
- *Perv*: o escoamento flui das áreas impermeáveis para as permeáveis
- *Outlet*: o escoamento de ambas as áreas flui para a saída do elemento

A escolha desse parâmetro depende da configuração do terreno e direção do escoamento em cada sub-bacia. Adicionalmente, é possível especificar a porcentagem do escoamento que é propagado dessa maneira. Como não foram consideradas áreas impermeáveis na presente aplicação, esse parâmetro não interfere na simulação.

Para a infiltração, será utilizado o método do Curve Number. Os valores para cada uso são apresentados na Tabela A 1.

4.5.2.1.2. Junções

Junções são os pontos de ligação entre elementos. Podem ser a confluência entre dois canais ou um poço de visita que recebe tubulações de drenagem. Podem receber fluxos externos e sofrer sobrecarga quando a vazão de entrada for superior a sua capacidade.

Os principais dados requeridos para as junções são apresentados na Tabela 4.7.

A elevação de fundo é a cota do fundo da junção, sendo determinada por meio de dados topográficos.

As lâminas iniciais e máximas são as alturas da coluna de água no início da simulação e seu valor máximo, respectivamente. São dados de campo, obtidos em função do tipo de junção e suas condições antecedentes ao evento. Quando o valor da lâmina máxima é considerado nulo, o programa utiliza a maior distância entre o fundo e a conexão de saída.

Tabela 4.7 – Informações requeridas para o elemento junção.

Dado	Descrição	Unidade
<i>Invert El.</i>	Elevação de fundo da junção	m
<i>Max. Depth</i>	Lâmina de água máxima	m
<i>Initial Depth</i>	Lâmina de água inicial	m
<i>Surcharge Depth</i>	Lâmina excedente à máxima antes da sobrecarga	m
<i>Ponded Area</i>	Área de alagamento na ocorrência de inundação	m ²

A altura de sobrecarga é o acréscimo à lâmina máxima que pode ocorrer antes da sobrecarga. Utilizado para poços de inspeção quando a altura começa a exceder a conexão de saída. Esse parâmetro não se aplica para o presente caso, que considera apenas a existência de canais naturais.

A área de alagamento é a superfície ocupada pela água acima da junção quando há sobrecarga. Quando esse valor é fornecido, o programa computa o total armazenado nessa área para depois retornar ao sistema assim que a capacidade da junção permitir. Na presente simulação evitou-se a sobrecarga de junções e canais pela extensão do leito natural dos canais à sua planície de inundação, evitando assim sua sobrecarga.

4.5.2.1.3. Condutos

Condutos são os elementos de ligação entre as junções. Podem ser tubulações ou canais.

Os principais dados requeridos para esses elementos são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Informações requeridas para o elemento conduto

Dado	Descrição	Unidade
<i>Shape</i>	Forma da seção	-
<i>Max. Depth</i>	Lâmina máxima da seção	m
<i>Length</i>	Comprimento do conduto	m
<i>Roughness</i>	Coefficiente de Manning	-
<i>Inlet Offset</i>	Distância entre fundo do conduto e nó de entrada	m
<i>Outlet Offset</i>	Distância entre fundo do conduto e nó de saída	m
<i>Initial Flow</i>	Vazão inicial do conduto	m ³ /s
<i>Maximum Flow</i>	Vazão máxima do conduto	m ³ /s

Existem 24 formatos de seção de condutos disponíveis no modelo. As escolhas variam desde formas geométricas de uso corrente até seções irregulares formadas por pontos definidos pelo usuário.

Foram utilizados os formatos de seções que correspondem às formas medidas em campo. Na maioria dos canais foi necessário ampliar a seção natural de escoamento para as planícies de inundação, para evitar as perdas por sobrecarga e, dessa maneira, não subestimar a vazão de pico na exutória da bacia.

A lâmina máxima é o maior valor de altura da água na seção. Determinado em função do formato e dimensões da mesma.

O comprimento do conduto é determinado por meio do seu traçado, obtido por digitalização de ortofotos do local e por meio do mapeamento realizado durante a saída de campo.

Valores para o coeficiente de Manning para condutos fechados são mostrados na Tabela 4.9, para canais abertos na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Coeficientes de Manning para condutos fechados.

Superfície	n	Superfície	n
Tubo de cimento amianto	0,011 – 0,015	Tubo de metal corrugado	
Tijolo	0,013 – 0,017	<i>Liso</i>	0,022 – 0,026
Tubo de ferro fundido		<i>Fundo pavimentado</i>	0,018 – 0,022
<i>Revestido com cimento e selante</i>	0,011 – 0,015	<i>Revestido com asfalto</i>	0,011 – 0,015
Concreto (monolítico)		Tubo de plástico	0,011 – 0,015
<i>Formas suaves</i>	0,012 – 0,014	Argila vitrificada	
<i>Formas irregulares</i>	0,015 – 0,017	<i>Tubos</i>	0,011 – 0,015
Tubo de concreto	0,011 – 0,015	<i>Chapas revestidas</i>	0,013 – 0,017

Fonte: Adaptado de ASCE (1982) *apud* Rossman (2010).

Tabela 4.10 – Coeficientes de Manning para canais abertos.

Tipo de canal	n	Tipo de canal	n
Canais revestidos		Escavado ou dragado	
<i>Asfalto</i>	0,013 – 0,017	<i>Terra, reto e uniforme</i>	0,020 – 0,030
<i>Tijolo</i>	0,012 – 0,018	<i>Terra, tortuoso e pouco uniforme</i>	0,025 – 0,040
<i>Concreto</i>	0,011 – 0,020		
<i>Cascalho ou riprap</i>	0,020 – 0,035	<i>Rocha</i>	0,030 – 0,045
<i>Vegetal</i>	0,030 – 0,40	<i>Sem manutenção</i>	0,050 – 0,140

Fonte: Adaptado de ASCE (1982) *apud* Rossman (2010).

O *Offset* é o degrau entre o ponto de conexão dos condutos com as junções. Como a presente aplicação trata de canais naturais, esse parâmetro é nulo.

As vazões iniciais e máximas são estimadas por meio do conhecimento das condições antecedentes ao evento e pela capacidade máxima do conduto, que é função de suas dimensões. A vazão inicial não foi medida para aplicação do modelo.

4.5.2.2. HEC-HMS

Os dados requeridos para aplicação desse modelo referem-se, como no modelo anterior, às sub-bacias, canais e junções. Estas últimas, embora componham o modelo, não necessitam de dados de entrada.

4.5.2.2.1. Sub-bacias

São os elementos que representam a bacia hidrográfica no modelo. Requerem a especificação dos métodos utilizados na simulação dos processos que ocorrem em seu interior. A partir dessa especificação são gerados os dados necessários correspondentes aos métodos selecionados. Para simulação de perdas pelo método do Curve Number e hidrograma sintético do SCS são requeridos os seguintes dados:

Tabela 4.11 – Dados requeridos para as sub-bacias utilizando o método SCS para perdas e geração do HU

Dado	Descrição	Unidade
<i>Area</i>	Área da bacia	km ²
<i>Initial Abstraction</i>	Perda inicial do Curve Number (<i>Ia</i>)	mm
<i>Curve Number</i>	Coeficiente de deflúvio médio do elemento	-
<i>Impervious</i>	Área impermeável diretamente conectada	%
<i>Lag Time</i>	Tempo de retardo da bacia	min

Dos dados apresentados na Tabela 4.11, somente a perda inicial e o tempo de retardo não estavam presentes no SWMM. O primeiro é a perda inicial, *Ia*, inerente ao método do Curve Number. Quando não é fornecido um valor, o programa considera como entrada uma perda inicial correspondente a 20% da retenção potencia máxima *S*, como visto em 4.2.1.4.3.

O tempo de retardo é o intervalo entre o centróide da precipitação efetiva e o pico de vazão. Definido pelo SCS como 60% do tempo de concentração da bacia. Para determinação do tempo de concentração de cada elemento foram utilizadas as mesmas relações utilizadas por Pompêo (2010) no estudo hidrológico do campus da UFSC em Joinville. São elas:

$$tc = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

$$tc = 5,3 \cdot \left(\frac{L^2}{I} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 4.25})$$

$$tc = 5,773 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,64} \quad (\text{Eq. 4.26})$$

$$tc = 5,862 \cdot \frac{L^{0,6}}{I^{0,3}} \quad (\text{Eq. 4.27})$$

Em que:

- *tc*: tempo de concentração, em min [T];
- *L*: comprimento do talvegue, em km [L];
- *I*: declividade do talvegue [L.L⁻¹]; e
- *H*: desnível do talvegue, em m [L].

As (Eq. 4.24) à (Eq. 4.27) correspondem às formulações propostas por Kirpich, Picking, Ven Te Chow e Carter, respectivamente.

A equação que retornou o maior valor em cada elemento foi a utilizada para determinação do tempo de retardo.

4.5.2.2.2. Junções

As junções são os elementos de ligação do modelo. Recebem o fluxo de vazão de um ou mais elementos de montante e geram a saída combinada desses fluxos. Nenhum processo é simulado nesses componentes, apenas é realizada a soma dos hidrogramas de entrada, não sendo, portanto, necessário a entrada de dados.

4.5.2.2.3. Canais

Os canais representam, assim como as junções, elementos que recebem uma ou mais contribuições de montante e geram apenas uma saída. Diferentemente das junções, os canais simulam processos hidrológicos. A seguir são apresentados os dados necessários para realizar a propagação em canais por meio do método da onda cinemática.

Tabela 4.12 - Dados requeridos para os canais utilizando o método de propagação por onda cinemática

Dado	Descrição	Unidade
<i>Length</i>	Comprimento	m
<i>Slope</i>	Declividade média	m/m
<i>Manning's n</i>	Coefficiente de rugosidade	-
<i>Subreaches</i>	Número de sub-canais	-
<i>Shape</i>	Formato da seção	-

O único dado de entrada peculiar desse modelo é o número de sub-canais, estando os outros agregados ao modelo anterior. Esse valor é apenas um dado de auxílio ao programa na determinação dos intervalos de cálculo da propagação no canal. Foi utilizado o valor padrão do modelo: dois.

Apenas cinco formatos de seções de canal para propagação do escoamento por onda cinemática são aceitos pelo modelo. Todas as seções medidas em campo se encaixam nos formatos disponíveis. Contudo, o modelo requer seções trapezoidais simétricas, fato incompatível com as seções dos canais B, C e F. Nesses casos as seções foram adaptadas para os requerimentos do modelo calculando-se novos

formatos equivalentes de mesma área, largura de fundo e altura máxima das seções originais.

4.5.3. CHUVA DE PROJETO

A chuva de projeto utilizada na aplicação do modelo é baseada na distribuição de Huff para o segundo quartil, gerada para um evento com período de recorrência de 50 anos. Essa configuração é bastante comum em estudos dessa natureza e, por isso, foi adotada.

O método de Huff é utilizado para distribuir dados de precipitação em diferentes configurações. A partir da duração da chuva e do valor total da precipitação ocorrida nesse intervalo, o método distribui a chuva em pulsos, com valores máximos localizados em cada um dos quartis de duração do evento, totalizando quatro diferentes configurações. Para aplicar o método é necessário definir a duração da chuva.

A duração da chuva de projeto deve ser tal que garanta a contribuição simultânea de toda a área de drenagem da bacia. Sendo assim, deve ser, no mínimo, o tempo de concentração da bacia.

Entende-se que o tempo de concentração da bacia é o intervalo de tempo necessário para que a partícula de água que incide no ponto mais remoto da bacia atinja sua exutória. Quando toda a área de drenagem da bacia contribui concomitantemente na geração do escoamento superficial atinge-se o pico de vazão da bacia.

Existem diversas fórmulas empíricas para estimar o tempo de concentração, algumas delas foram apresentadas no item 4.5.2.2.1. Semelhantes fórmulas não devem ser vistas como parâmetro definitivo na chuva de projeto, uma vez que existem incertezas em sua definição. Segundo Silveira (2005), essas incertezas são decorrentes do próprio conceito de tempo de concentração.

A partir da aplicação do modelo HEC-HMS (que exige como o tempo de concentração como dado de entrada) sabe-se que o tempo de concentração da bacia como um todo é aproximadamente 40 min. Sendo assim, para definir a duração da chuva de projeto foram simuladas várias chuvas com durações que variam numa faixa próxima a esse valor (de 30 a 60 min de duração). O evento que resultou em maiores picos de vazão foi aquele que definiu a duração da chuva de projeto.

As simulações foram realizadas a partir dos dados de precipitação das curvas de intensidade, duração e frequência para o período de retorno de 50 anos, mantendo-se a intensidade do evento constante

durante toda sua ocorrência. Os resultados das simulações podem ser visualizados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Picos de vazão, em m³/s, para diferentes durações de chuva

Duração da chuva [min]	Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3	
	HEC	SWMM	HEC	SWMM	HEC	SWMM
30	26,4	23,9	17,9	16,3	11,1	15,3
45	31,1	29,1	21,9	21,3	16,9	19,8
40	34,0	32,6	25,1	25,1	21,6	23,5
45	36,3	34,5	27,3	27,8	25,1	26,1
50	37,2	35,1	28,4	29,4	27,2	27,6
55	36,9	34,6	28,5	29,9	28,1	28,2
60	35,5	33,5	28,0	29,5	27,9	27,8

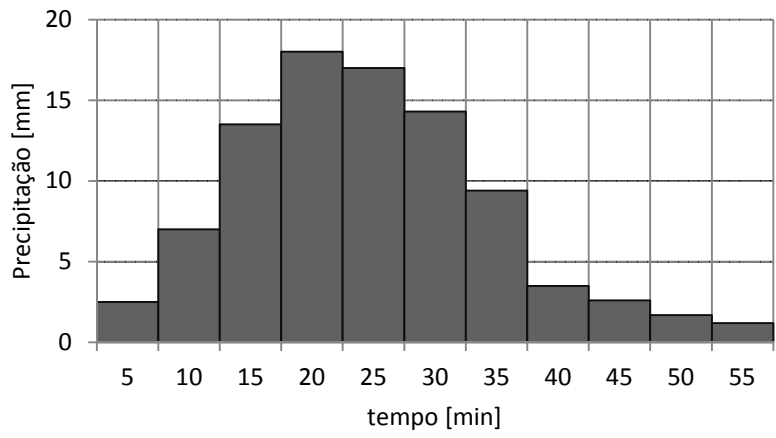
A Tabela 4.13 indica que os maiores picos de vazão ocorrem para os eventos de 50 e 55 min de duração. Dessa maneira, será escolhida a duração de 55 min como duração da chuva de projeto. Esse valor produz um total de 90,7 mm de precipitação, considerando um período de retorno de 50 anos.

A Tabela 4.14 e a Figura 4.13 apresentam a chuva de projeto resultante da aplicação do método de Huff no segundo quartil para esse evento.

Tabela 4.14 - Chuva de projeto

tempo [min]	Precipitação acumulada [mm]	Precipitação incremental [mm]
0	0,0	0,0
5	2,5	2,5
10	9,5	7,0
15	23,0	13,5
20	41,0	18,0
25	58,0	17,0
30	72,3	14,3
35	81,7	9,4
40	85,2	3,5
45	87,8	2,6
50	89,5	1,7
55	90,7	1,2

Figura 4.13 – Chuva de projeto



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelo exposto até o momento espera-se obter os seguintes resultados com a aplicação dos modelos:

- Vazões de pico simuladas pelo HEC-HMS com valores iguais ou maiores aos máximos obtidos pelo SWMM.; e
- Alteração sistemática dos picos de vazão com os diferentes níveis de discretização (as fontes pesquisadas divergiam nas tendências).

A seguir são analisados os resultados obtidos de acordo com os objetivos estabelecidos.

5.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

A comparação entre os modelos é a análise dos resultados de cada modelo para cada uma das configurações adotadas.

5.1.1. CONFIGURAÇÃO 1

Os hidrogramas resultantes para a configuração 1 são apresentados na Figura 5.1. A simulação com o HEC-HMS resultou em pico de vazão de 42,24 m³/s, já o modelo SWMM resultou em 30,66 m³/s, atingindo 72,6% do valor do primeiro. É possível observar que tempos de ascensão dos hidrogramas foram semelhantes, tendo valores de 45 min para o HEC-HMS e 50 min para o SWMM. Essa diferença entre os tempos tem reflexo nas curvas de recessão dos hidrogramas, que são mais suaves no modelo SWMM.

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros resultantes para as sub-bacias nos dois modelos. As perdas e o escoamento superficial para cada elemento foram semelhantes, como esperado, já que esses processos foram representados pelo mesmo método, mas as vazões de pico para cada elemento divergiram, conforme a Figura 5.2. Isso indica que as representações das características das bacias e do escoamento superficial na bacia foram distintas. Nesses quesitos, o modelo SWMM é mais detalhista, levando em conta parâmetros físicos da bacia e características das superfícies, enquanto os métodos aplicados no HEC-HMS são mais simplistas, agregando todos esses fatores no tempo de concentração e no hidrograma adimensional.

Figura 5.1 – Hidrogramas resultantes para a configuração 1

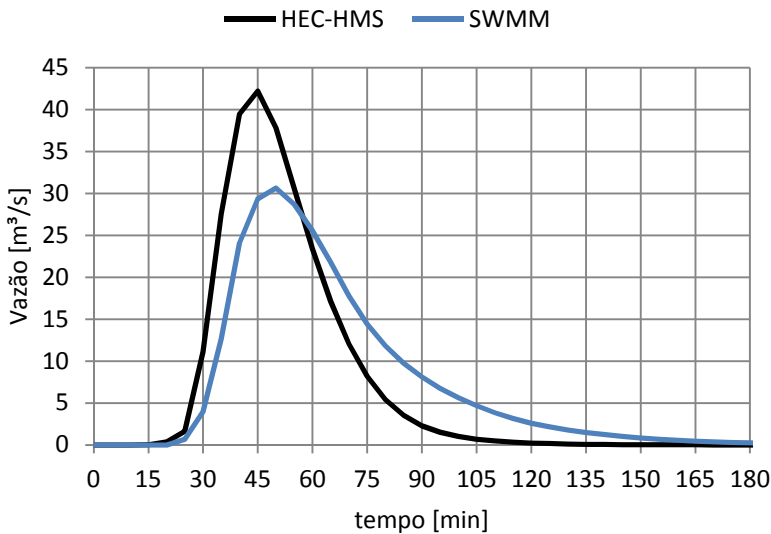
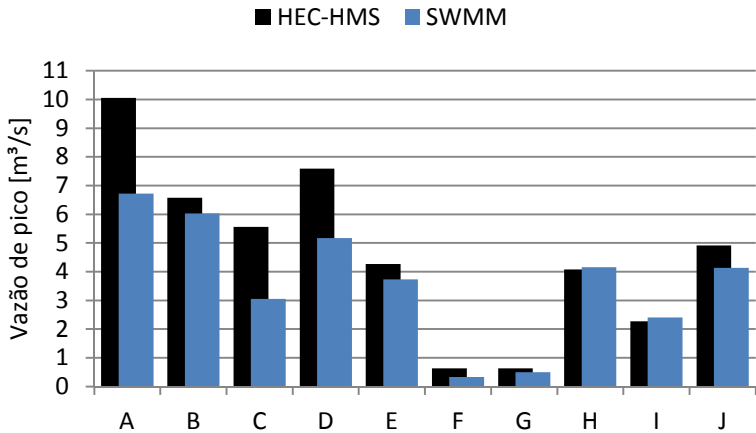


Tabela 5.1 – Parâmetros resultantes para as sub-bacias na configuração 1

Elemento	Perdas [mm]		Escoamento superficial [mm]		Vazão de pico [m³/s]	
	HEC	SWMM	HEC	SWMM	HEC	SWMM
A	60,17	60,73	30,53	30,15	10,05	6,72
B	66,01	61,69	24,69	28,27	6,58	6,03
C	60,79	62,07	29,91	28,40	5,56	3,05
D	65,47	65,53	25,23	25,31	7,59	5,17
E	55,39	54,26	35,31	36,69	4,27	3,73
F	56,82	57,3	33,88	31,46	0,63	0,33
G	52,70	52,45	38,00	38,47	0,63	0,50
H	66,03	60,57	24,67	29,37	4,08	4,15
I	51,10	46,66	39,60	43,29	2,27	2,40
J	55,87	54,85	34,83	36,10	4,91	4,13

Figura 5.2 - Vazões de pico para as sub-bacias na configuração 1



Para os canais que compõem as bacias, os parâmetros resultantes são apresentados na Tabela 5.2. É natural que os canais modelados no HEC-HMS apresentem maiores vazões, uma vez que os mesmos recebem as contribuições das sub-bacias.

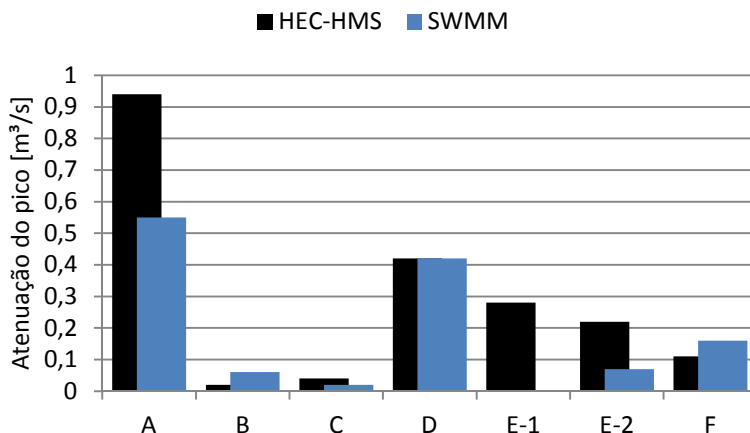
Tabela 5.2 – Parâmetros resultantes para os canais na configuração 1

Elemento	Vazão de pico [m³/s]		Atenuação do pico de vazão [m³/s]	
	HEC-HMS	SWMM	HEC-HMS	SWMM
A	15,69	12,21	0,94	0,55
B	1,09	0,55	0,02	0,06
C	4,41	2,42	0,04	0,02
D	11,57	7,13	0,42	0,42
E-1	21,20	16,28	0,28	0,00
E-2	33,18	23,15	0,22	0,07
F	38,02	27,62	0,11	0,16

O fenômeno de atenuação do pico de vazão por meio da propagação de onda nos canais apresentou diferenças significativas entre alguns elementos nos modelos, como pode ser visualizado na Figura 5.3. O total atenuado pelo HEC-HMS foi de 2,03 m³/s, contra 1,28 m³/s pelo SWMM, ou seja, 63,1% do valor do primeiro (o valor total mencionado é utilizado apenas como um indicador). Em geral, o efeito de atenuação foi mais significativo no HEC-HMS. Para simular esse fenômeno foi utilizado o mesmo método em ambos os modelos, mas há duas diferenças que influenciam nos resultados: primeiro, o modelo HEC-HMS é bastante limitado na representação das seções dos canais, fato

que levou a adaptação das seções de alguns canais para implementação nos modelo, conforme frisado no item 4.5.2.2.3. Além disso, o modelo não considera uma capacidade máxima para o canal, fato esse que não ocorre no outro modelo, que apresenta a possibilidade de definição de seções irregulares e especificação de planícies de inundação com rugosidades específicas. Em segundo lugar deve ser considerado que os hidrogramas de adentram os canais são distintos, uma vez que os elementos a eles conectados têm respostas diferentes.

Figura 5.3 – Atenuação da vazão de pico para os canais na configuração 1



5.1.2. CONFIGURAÇÃO 2

Os hidrogramas resultantes para a configuração 2 são apresentados na Figura 5.4. A simulação com o HEC-HMS resultou em pico de vazão de 39,33 m³/s, já o modelo SWMM resultou em 28,51 m³/s, atingindo 72,5% do valor do primeiro. Além disso, é possível observar que os tempos de ascensão dos hidrogramas não sofreram alterações, ocorreram novamente em 45 min para o HEC-HMS e em 50 min para o SWMM.

A Tabela 5.3 mostra os parâmetros resultantes para as bacias nos dois modelos. Como no caso anterior, as perdas e o escoamento superficial para cada elemento foram semelhantes, mas as vazões máximas divergiram. De maneira análoga, essa divergência pode ser atribuída às diferenças na representação das bacias que ocorreram nos dois modelos.

Figura 5.4 - Hidrogramas resultantes para a configuração 2

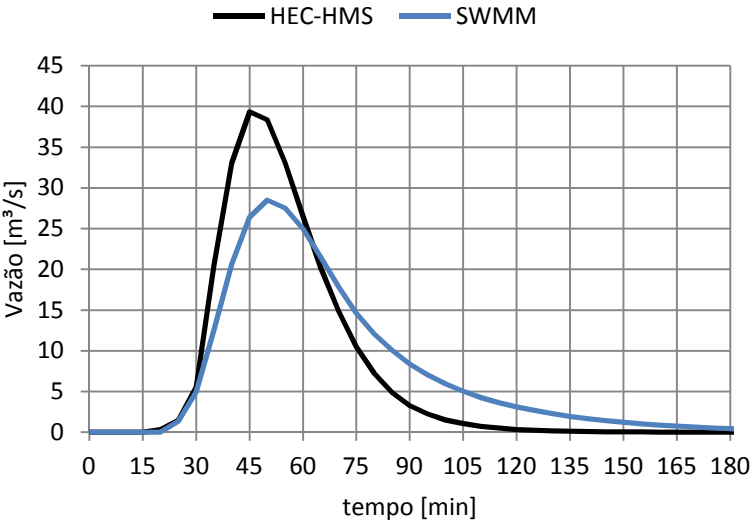


Tabela 5.3 - Parâmetros resultantes para as sub-bacias na configuração 2

Elemento	Perdas [mm]		Escoamento superficial [mm]		Vazão de pico [m³/s]	
	HEC	SWMM	HEC	SWMM	HEC	SWMM
AB	62,75	61,78	27,95	28,81	16,14	12,38
CEF	58,53	56,97	32,17	31,53	9,11	6,95
DG	64,88	64,26	25,82	25,31	7,21	5,32
HIJ	59,99	57,60	30,71	33,02	9,29	9,77

A Figura 5.5 mostra que, regra geral, as vazões de pico obtidas pelo HEC-HMS são mais elevadas.

Para os canais que compõem as bacias, os parâmetros resultantes são apresentados na Tabela 5.4. Como consequência direta das vazões mais elevadas no modelo HEC-HMS, as vazões de pico nos canais desse modelo foram mais elevadas.

Os valores de atenuação de vazão nos canais podem ser visualizados na Figura 5.6. Diferenças acentuadas ocorreram entre elementos idênticos, totalizando 2,41 m³/s atenuados para o HEC-HMS e 1,58 m³/s para o SWMM. Sendo assim, o total atenuado por esse último representa 65,6% do valor atenuado pelo primeiro, razão próxima da anterior.

Figura 5.5 – Vazões de pico para as sub-bacias na configuração 2

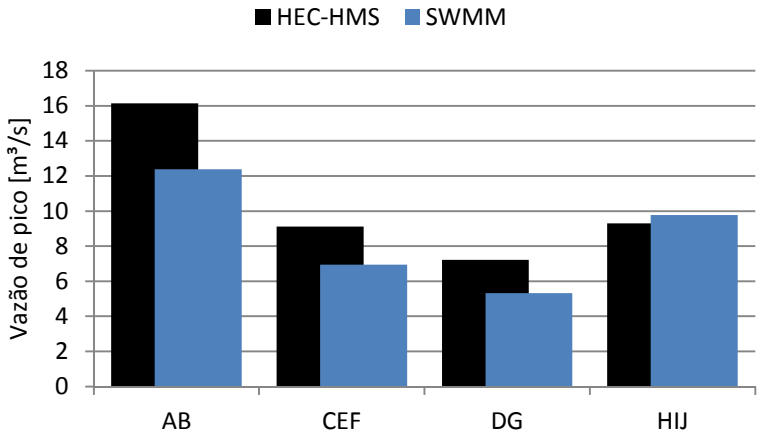
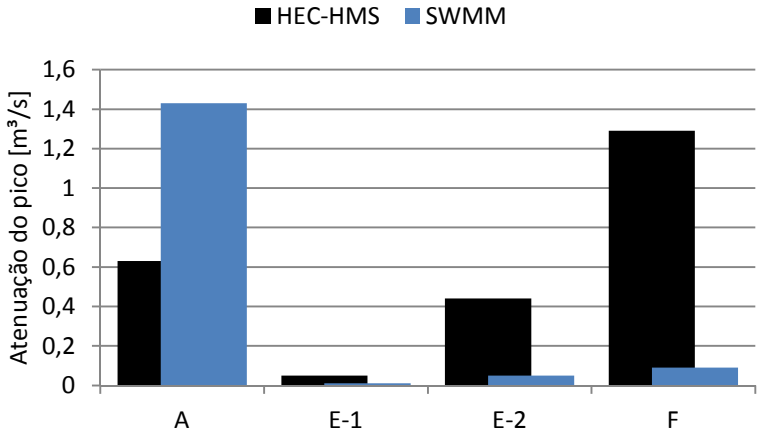


Tabela 5.4 – Parâmetros resultantes para os canais na configuração 2

Elemento	Vazão de pico [m³/s]		Atenuação do pico de vazão [m³/s]	
	HEC-HMS	SWMM	HEC-HMS	SWMM
A	15,51	10,95	0,63	1,43
E-1	24,57	16,94	0,05	0,01
E-2	31,34	21,87	0,44	0,05
F	30,05	21,78	1,29	0,09

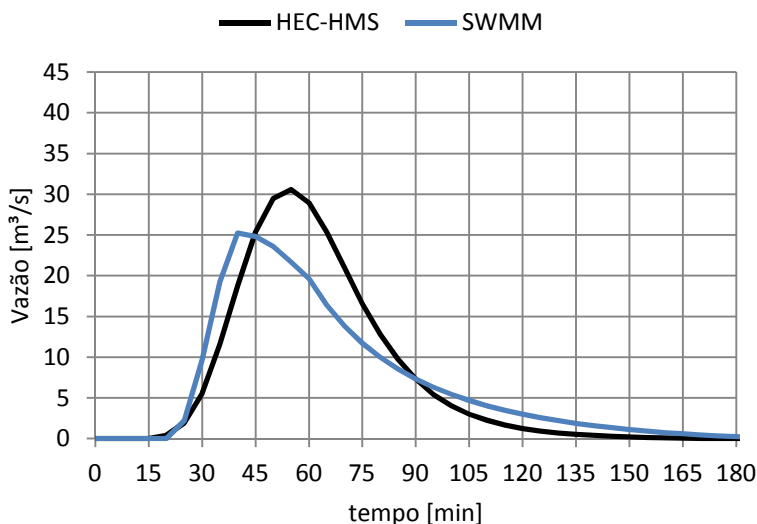
Figura 5.6 – Atenuação da vazão de pico nos canais para a configuração 2



5.1.3. CONFIGURAÇÃO 3

Os hidrogramas resultantes para a configuração 3 são apresentados na Figura 5.7. A simulação com o HEC-HMS resultou em pico de vazão de 30,58 m³/s, já o modelo SWMM resultou em 25,24 m³/s, atingindo 82,6% do valor do primeiro. Além disso, é possível observar que nesse caso houve um distanciamento entre os tempos de ascensão de cada hidrograma. O pico do hidrograma simulado pelo HEC-HMS ocorreu em 55 min, em constraste com 40 min do outro. Dessa maneira, em relação às configurações anteriores, pode-se dizer que ocorreu a diminuição entre as diferenças dos picos de vazão, mas, em contrapartida, houve uma maior divergência entre os tempos de ascensão dos hidrogramas.

Figura 5.7 - Hidrogramas resultantes para a configuração 3



A Tabela 5.5 mostra os parâmetros resultantes para as bacias nos dois modelos. Como nos outros casos, as perdas e o escoamento superficial para cada elemento foram semelhantes e as vazões máximas divergiram.

Como nessa configuração só existe um elemento representando a bacia, a estimativa do tempo de concentração para o HEC-HMS e a largura representativa da bacia e sua declividade para o SWMM tem papel fundamental na definição das características da bacia como um

todo. Nesse nível de configuração torna-se difícil mensurar esses parâmetros e, como não existem mais elementos para representar a bacia, os mesmos exercem grande influência nos dados de saída.

Tabela 5.5 – Parâmetros resultantes para as bacias na configuração 3

Elemento	Perdas [mm]		Escoamento superficial [mm]		Vazão de pico [m³/s]	
	HEC	SWMM	HEC	SWMM	HEC	SWMM
Bacia	61,78	61,60	28,92	27,69	30,58	25,24

Como esperado, nas três configurações o modelo HEC-HMS apresentou vazões de pico mais elevadas que o modelo SWMM. Essa diferença entre de resposta entre os modelos, contudo, não foi tão acentuada como a verificada por Zarrielo (1998).

5.2. DISCRETIZAÇÃO

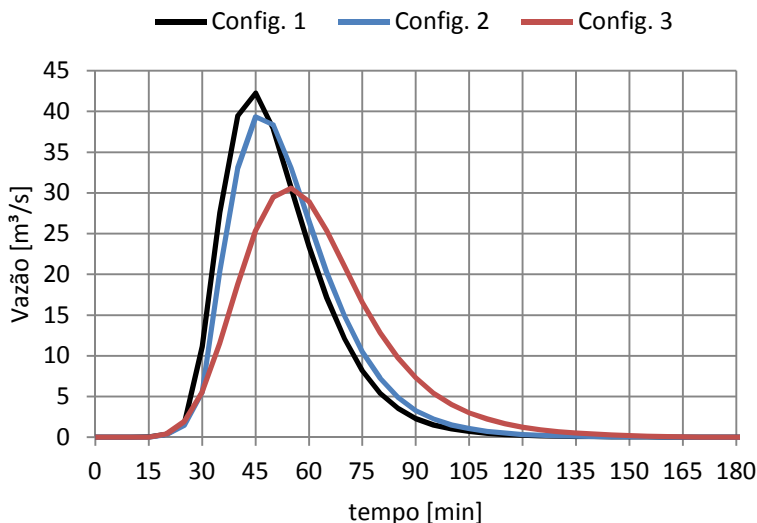
Os efeitos da discretização da bacia nos hidrogramas finais são analisados para cada modelo nas três configurações adotadas.

5.2.1. HEC-HMS

A Figura 5.8 ilustra os hidrogramas finais obtidos para o HEC-HMS nas três configurações. É possível observar que os picos de vazão diminuíram sistematicamente com a simplificação da bacia

Os picos de vazão atingidos para as configurações 1, 2 e 3 foram 42,24, 39,33 e 30,58 m³/s, respectivamente. Na configuração 1 e 2 os tempos de ascensão foram 45 min. A configuração três teve ascensão 10 min mais tarde. A Tabela 5.6 mostra esses resultados. É possível observar que o escoamento superficial teve pouca alteração nas simulações, o que indica que outros fatores determinaram os diferentes hidrogramas. Além disso, embora na configuração não tenha ocorrido atenuação em canais, sua diferença de vazão máxima com a configuração anterior foi mais acentuada.

Figura 5.8 - Hidrogramas resultantes para o modelo HEC-HMS



Como mencionado anteriormente, a medida que a bacia é simplificada, parâmetros que definem suas características físicas ficam mais difíceis de serem mensurados, o que pode explicar essa variação na resposta para as diferentes configurações.

Tabela 5.6 – Parâmetros resultantes para o modelo HEC-HMS

Configuração	Vazão de pico [m³/s]	Tempo de ascensão [min]	Escoamento superficial [mm]	Σ Atenuação nos canais [m³/s]
1	42,24	45	29,12	2,03
2	39,33	45	28,92	2,41
3	30,58	55	28,92	0,00

5.2.2. SWMM

A Figura 5.9 ilustra os hidrogramas finais obtidas para o SWMM nas três configurações. É possível observar que também nesse modelo os picos de vazão diminuíram sistematicamente com a diminuição do detalhamento da bacia.

Os picos de vazão atingidos para as configurações 1,2 e 3 foram 30,66, 28,51 e 25,24 m³/s, respectivamente. Na configuração 1 e 2 os tempos de ascensão foram 50 min. A configuração três teve ascensão 10 min mais cedo. Neste ponto, a resposta do modelo foi bastante diversa

do modelo anterior, em que o pico foi deslocado para adiante e a diferença entre os picos entre as configuração 1 e 2 foi mais acentuada.

A Tabela 5.7 mostra os resultados para esse modelo. O escoamento superficial teve queda gradativa, juntamente com a vazão máxima. Exceto pelo tempo de ascensão, nesse modelo as diferenças entre as configurações foram menos bruscas, indicando uma maior estabilidade às alterações nos níveis de discretização da bacia. Isso é justificado pela existência de diversos parâmetros de caracterização da bacia e do escoamento no modelo, diferentemente do outro, que agrega vários aspectos em menor número de parâmetros.

Figura 5.9 - Hidrogramas resultantes para o modelo SWMM

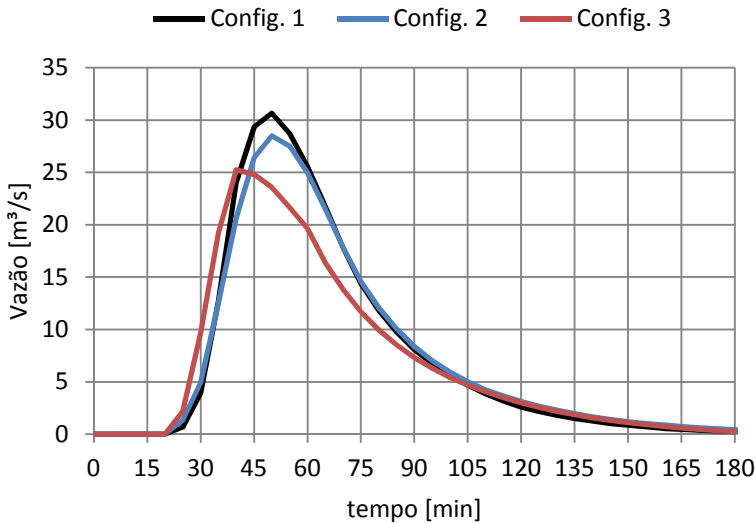


Tabela 5.7 - Parâmetros resultantes para o modelo SWMM

Configuração	Vazão de pico [m³/s]	Tempo de ascensão [min]	Escoamento superficial [mm]	Σ Atenuação nos canais [m³/s]
1	30,66	50	30,19	1,28
2	28,51	50	29,55	1,58
3	25,24	40	27,69	0,00

Nota-se que os resultados obtidos com a discretização da bacia no modelo SWMM apresentam uma semelhança significativa com os resultados de um dos cenários (2,1 % de impermeabilidade) obtidos por Dankenbring e Mays (2009), conforme visto no item 3.5. Na presente

situação, a relação obtida entre o pico máximo e o mínimo é também de cerca de 1,2, sendo as bacias também semelhantes. O que diferiu nos dois casos foi o total escoado, que não permaneceu inalterado na presente simulação. Os autores desse mesmo artigo sugerem que há diferentes respostas aos níveis de discretização da bacia em ambientes urbanos e rurais. Fato esse que é reforçado se for considerado que, dentre os trabalhos apresentados no item 3.5, o único que obteve resposta distinta aos efeitos da discretização - se comparado aos outros - foi aquele aplicado em bacias urbanas.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou a aplicação de dois modelos hidrológicos em uma pequena bacia hidrográfica do município de Joinville, Santa Catarina, e analisou suas respostas para três configurações de bacia. A partir dos resultados apresentados são feitas as seguintes conclusões:

A medida que a bacia é simplificada, a mensuração de alguns de parâmetros que representam suas características físicas (como largura representativa, declividade e tempo de concentração) torna-se mais imprecisa e mais influente na resposta da mesma, uma vez que menos elementos a constituem.

Embora as sub-bacias tenham apresentado lâminas de escoamento superficial semelhantes, os picos de vazão encontrados foram diversos, indicando que as diferentes formas de representação das características físicas e do escoamento nos modelos têm influência significativa nos resultados finais.

A atenuação de vazão de pico nos canais mostrou comportamento distinto entre os dois modelos, embora tenham sido utilizados os mesmos métodos. Em geral, o modelo HEC-HMS apresentou maiores valores de atenuação de pico de vazão, sendo que, em média, a atenuação de pico resultante do outro modelo foi de 64,3% o valor do primeiro. Valores de entrada como hidrogramas afluentes e representação das seções tem influência nesses resultados.

Como esperado, o modelo HEC-HMS apresentou maiores valores de vazão simulados em todas as configurações adotadas. Em média, o modelo SWMM apresentou picos de vazão que representam 75,9% do HEC-HMS.

Na análise dos efeitos da discretização da bacia foi constatado que, em ambos os modelos, a diminuição do detalhamento da bacia ocasionou o rebaixamento do pico do hidrograma (diminuição total de 27,6% no HEC-HMS e 17,7% no SWMM) provavelmente decorrente das simplificações necessárias que ocorrem nesse processo.

Não é possível afirmar se um dos modelos representou mais fielmente a resposta da bacia aos eventos simulados, uma vez não existem dados medidos para a área de estudo. É possível que os dois modelos possam apresentar bons resultados na modelagem de bacias com características semelhantes da estudada, contanto que existam dados observados para realizar a calibração dos modelos.

Como conclusão geral, pode-se dizer que este trabalho serve para enfatizar a importância da relação entre modelagem hidrológica e

monitoramento de bacias. Como foi visto, modelos apresentam respostas distintas para mesmos eventos em locais idênticos, pois cada um é apenas uma interpretação parcial dos fenômenos hidrológicos que ocorrem num determinado espaço. É nesse contexto que o monitoramento tem importância, pois é a partir dele que a representação advinda da modelagem pode ser mais próxima da realidade.

Para trabalhos futuros recomenda-se analisar situações análogas à apresentada, de posse de dados medidos. Nesses casos, a aplicação dos modelos deve também ser feita a partir da situação não calibrada, para verificar algo que o presente estudo não pôde: qual modelo apresenta uma estimativa inicial (sem calibração) mais próxima da realidade. Adicionalmente, pode-se também averiguar nessa situação a influência que as diferentes considerações de cada modelo têm em sua calibração, pois, como foi visto, modelos diferem muito entre si em questões de representação da bacia. Dessa maneira, embora um modelo mais detalhista possa ser mais exigente quanto aos dados necessários para seu funcionamento, esse esforço maior pode se traduzir em maior estabilidade ou facilidade de calibração, já que permite maior liberdade de alteração ou manipulação de parâmetros.

7. REFERÊNCIAS

ABBOTT, M.B., REFSGAARD J.C. (Eds.). **Distributed hydrological modelling**. Kluwer Academic Pub. 1996

BEVEN, K.J. **How far can we go in distributed hydrological modelling?** HESS, v.5, n.112, 2001.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. **Applied hydrology**. New York: McGraw-hill Book, 1988. 572p.

COLLODEL, M.G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. São Carlos, 2009. 219f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Dankenbring, S.C. e Mays, D.C. **Catchment discretization in the Colorado Urban Hydrograph Procedure: A case study in the East Toll Gate Creek watershed, Arapahoe County, Colorado**. Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, 2009

GARCIA, J.I.B. **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da bacia Hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por Meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica**. Belo Horizonte: UFMG – Tese de Mestrado, 2007.

HILLEL, D. **Computer simulation of soil-water dynamics: A compendium of recent work**. International Development Research Center, 1977, 214 p.

HUBER, W. C., DICKINSON, R.E. **Stormwater management model Version 4, User's Manual**. EPA 600/3 88 001a. Athens (GA): US EPA; 1988.

JANG, S. CHO, M.; YOON, J.; YOON, Y.; KIM, S.; KIM, G.; KIM, L.; AKSOY, H. **Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment**. Desalination 212 (2007) 344–356. 2007 Elsevier B.V

KOBIYAMA, M. **Manejo de Bacias Hidrográficas - Conceitos básicos**. In: Curso “Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal”, Apostila, Curitiba: FUPEF, 1999. p. 29-31.

KOBIYAMA, M.; MANFROI, O. J. **Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas**. In: Curso “Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal”, Apostila, Curitiba: FUPEF, 1999. p. 81-88.

LIDDG (Low Impact Development Design Group, The). **Metro West. Swmm Analysis Report**. Fairfax County, Virginia .October 1, 2005

LOPES, V., L.; CANFIELD, E. **Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling**. Journal of the American Water resources Association (JAWRA), 2004. p.311-319.

MACEDO, R. L. **Estudo hidrológico da bacia do Rio Negrinho - SC utilizando o HEC-HMS**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2010. 50 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC)

MELLER, A. **Simulação Hidrodinâmica Integrada de Sistema de Drenagem em Santa Maria-RS**. 2004. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MORE, R. **Os Modelos Hidrológicos e a Geografia**. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos físicos e de informação geográfica**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1975. p. 104-138.

POMPÊO, C., A. **Estudo Hidrológico: bacia hidrográfica à montante do local de implantação do futuro Campus da UFSC em Joinville**. Florianópolis: UFSC, 2010. 38p.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. INPE, 2000. 65f. (Relatório Técnico Parcial).

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model Applications Manual**. National Risk Management Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH. 2009.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual version 5.0**. National Risk Management Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH., 2010.

SEPLAN. **Base Cartográfica do Perímetro Urbano de Joinville**. Prefeitura Municipal de Joinville, 2007. Escala 1:1.000. Executado por Aeroimagem Engenharia e Aerolevantamento, 2007.

SEPLAN. **Ortofotos**. Prefeitura Municipal de Joinville , 2007. Escala de vôo 1:5.000. Executado por Aeroimagem Engenharia e Aerolevantamento, 2007.

SILVA, R.V. **Análise comparativa de três formulações do TOPMODEL na bacia do Rio Pequeno - PR**. Florianópolis, 2005. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVEIRA, A. L. L. **Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 10, 2005. p.5-23.

SINGH, V.P.; FREVERT, D.K., 2006. **Watershed Models**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, (2006), pp. 653

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1ª ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669p.

USACE-HEC. **Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, March 2000.

USACE-HEC. **Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – User’s Manual 3.5.** US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, March 2010.

VESTENA, L.R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2008. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

ZAGHLOUL, N. A., **Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation.** Adv. Water Resources, Volume 6, 1983.

ZHANG, Z., & JOHNSON, B. E. **HEC-HMS development in support of Russian river watershed assessment.** ERDC/EL TN-10-3. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2010.

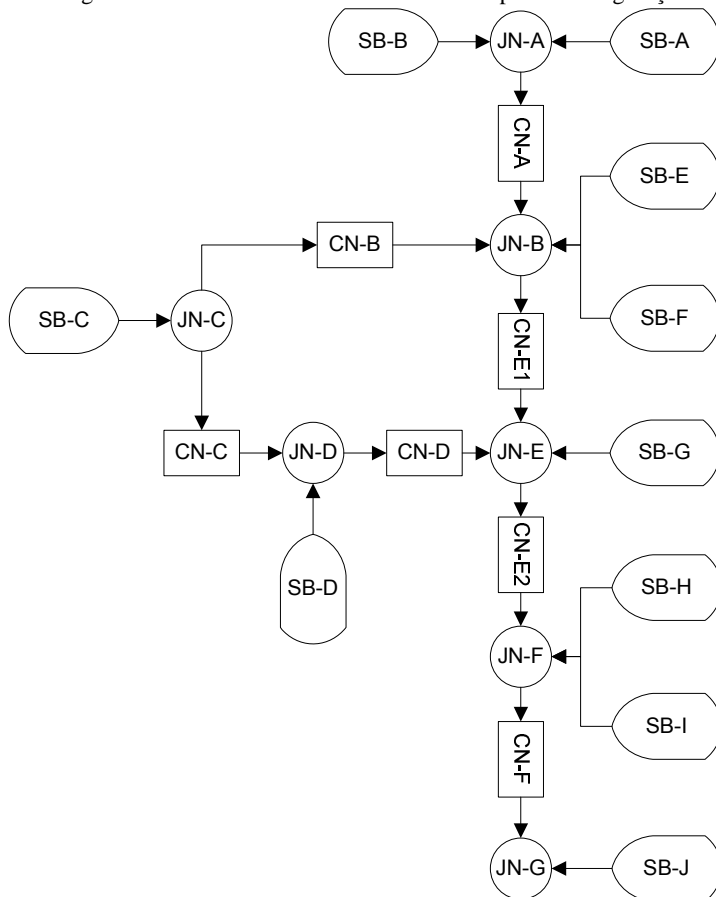
ZARRIELLO, P.J. **Comparison of nine uncalibrated runoff models to observed flows in two small urban watersheds,** *in* Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, April 19-23, 1998, Las Vegas, NV: Subcommittee on Hydrology of the Interagency Advisory Committee on Water Data, p. 7-163 to 7-170.

ANEXOS

ANEXO A - ELEMENTOS DA BACIA

A tabela abaixo mostra os elementos utilizados para representar a bacia no modelo na configuração 1. As outras configurações são derivadas desta.

Figura A 1 - Elementos utilizados no modelo para a configuração 1



OBS: nas configurações 1 e 2 a junção C foi considerada um divisor de fluxo que transmite 1/5 da vazão afluyente para o canal B e 4/5 para o canal C.

ANEXO B - USOS DO SOLO

A abaixo apresenta os valores de CN utilizados para cada uso do solo.

Tabela A 1 - Valores de CN para os diferentes usos do solo

Uso	CN
Água	0
Cultivo de Arroz	79
Solo Exposto	82
Solo Exposto (Agricultura)	79
Pastagem (campo)	75
Estrada de Terra	87
Vegetação de Transição	78
Áreas Urbanas	83
Vegetação Nativa	70

Fonte: Pompêo (2010)

Os usos do solo para cada sub-bacia e seu valor de CN são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela A 2 - Usos do solo para as sub-bacias A, B e C

Dado	Sub-bacia A		Sub-bacia B		Sub-bacia C	
	Área [km²]	%	Área [km²]	%	Área [km²]	%
Água	0,01611	2,76	0,03325	7,59	0,00572	1,84
Cultivo de Arroz	0,07120	12,21	0,00000	0,00	0,00000	0,00
Solo Exposto	0,00926	1,59	0,00004	0,01	0,01508	4,85
Solo Exposto (Agricultura)	0,00000	0,00	0,00262	0,60	0,00000	0,00
Pastagem (campo)	0,09398	16,11	0,25620	58,48	0,04551	14,63
Estrada de Terra	0,00451	0,77	0,00003	0,01	0,00177	0,57
Vegetação de Transição	0,13102	22,46	0,04586	10,47	0,04692	15,08
Áreas Urbanas	0,02182	3,74	0,00158	0,36	0,02016	6,48
Vegetação Nativa	0,23549	40,37	0,09853	22,49	0,17587	56,54
TOTAL	0,58338	100,0	0,43811	100,0	0,31103	100,0
CN	72,58		68,55		72,17	

Tabela A 3 - Usos do solo para as sub-bacias D, E e F

Dado	Sub-bacia D		Sub-bacia E		Sub-bacia F	
	Área [km²]	%	Área [km²]	%	Área [km²]	%
Água	0,0311	5,67	0,0025	1,17	0,0000	0,06
Cultivo de Arroz	0,0033	0,61	0,0018	0,83	0,0000	0,05
Solo Exposto	0,0121	2,22	0,0217	10,07	0,0021	6,46
Solo Exposto (Agricultura)	0,0065	1,19	0,0000	0,00	0,0000	0,00
Pastagem (campo)	0,0697	12,71	0,0981	45,60	0,0165	51,10
Estrada de Terra	0,0046	0,84	0,0074	3,44	0,0000	0,00
Vegetação de Transição	0,0992	18,09	0,0504	23,41	0,0056	17,35
Áreas Urbanas	0,0107	1,96	0,0064	2,99	0,0001	0,18
Vegetação Nativa	0,3110	56,72	0,0268	12,48	0,0080	24,81
TOTAL	0,54826	100,0	0,21510	100,0	0,03230	100,0
CN	68,94		75,59		74,71	

Tabela A 4 - Usos do solo para as sub-bacias G, H e I

Dado	Sub-bacia G		Sub-bacia H		Sub-bacia I	
	Área [km²]	%	Área [km²]	%	Área [km²]	%
Água	0,0003	0,90	0,0236	8,76	0,0005	0,51
Cultivo de Arroz	0,0165	55,76	0,0046	1,69	0,0702	77,44
Solo Exposto	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0004	0,47
Solo Exposto (Agricultura)	0,0000	0,00	0,0029	1,08	0,0000	0,00
Pastagem (campo)	0,0003	1,16	0,1487	55,25	0,0137	15,11
Estrada de Terra	0,0067	22,63	0,0066	2,47	0,0016	1,73
Vegetação de Transição	0,0003	1,06	0,0232	8,62	0,0032	3,55
Áreas Urbanas	0,0054	18,28	0,0112	4,17	0,0007	0,80
Vegetação Nativa	0,0001	0,22	0,0483	17,95	0,0004	0,40
TOTAL	0,02966	100,0	0,26913	100,0	0,09069	100,0
CN	77,19		68,53		78,11	

Tabela A 5 - Usos do solo para a sub-bacia J

Dado	Sub-bacia J	
	Área [km²]	%
Água	0,0011	0,47
Cultivo de Arroz	0,0021	0,85
Solo Exposto	0,0090	3,72
Solo Exposto (Agricultura)	0,0000	0,00
Pastagem (campo)	0,1440	59,30
Estrada de Terra	0,0054	2,23
Vegetação de Transição	0,0491	20,19
Áreas Urbanas	0,0027	1,10
Vegetação Nativa	0,0295	12,14
TOTAL	0,24293	100,0
CN	75,30	